

MONITOREO INALAMBRICO DE GASES EN MINERIA CON SERVICIO WEB EN TIEMPO REAL FASE II

MARTIN EDGAR ALBARRACIN CHINOME

GERMAN ANDRES GUTIERREZ PATIÑO

Tesis presentada como requisito para obtener el título de

INGENIERO ELECTRONICO

Director:

HERMAN ANTONIO FERNANDEZ GONZALEZ

Profesor Asociado

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA

FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

SOGAMOSO

2014

NOTA DE ACEPTACION

HERMAN ANTONIO FERNANDEZ GONZALEZ PH.D.
Director de la Tesis

DIRECTOR DE ESCUELA

JURADO

JURADO

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
SOGAMOSO, Octubre del 2014

RECONOCIMIENTOS

El autor desea expresar su reconocimiento a las personas que de una u otra forma colaboraron en el desarrollo de este proyecto:

Al PhD. Herman Antonio Fernandez Gonzalez por acompañamiento como director de este proyecto.

Al PhD. Juan Mauricio Salamanca por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Al Msc. Eduardo Avendaño Fernandez por su interes en el desarrollo del proyecto.

Al Msc. Oscar Ivan Higuera Martinez por la orientación en el desarrollo del proyecto.

Al Inv. Jhon Jairo Niño Merchán por su colaboración en los temas mineros y pruebas de campo.

Al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) por su colaboración en las pruebas de campo que se realizaron para el proyecto.

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este trabajo
A Dios que me ha dado fortaleza
y sabiduría para terminar este
proyecto de investigación,
a mis padres por estar ahí
cuando más los necesité; en
especial a mi madre por ser
mi principal motivación de
salir adelante

Un hombre puede ser tan grande
como quiera ser. Si usted cree
en usted mismo y tiene el valor,
la determinación, la dedicación,
la competitividad y si usted está
dispuesto a sacrificar las cosas
pequeñas de la vida y pagar el
precio por las cosas que requieren
más trabajo.

Vince Lombardi

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que pasaron por mi vida y me dieron su apoyo y palabra de aliento, su abrazo, cariño y fuerza para que se lograra el objetivo de ser un gran profesional y una mejor persona, especialmente a mis padres por su apoyo incondicional. Gracias a todos los que creyeron en mí, puesto que aquí se tiene el fruto de todas sus energías.

“Mi máximo respeto y mi máxima admiración a todos los ingenieros, especialmente al mayor de todos ellos: Dios.”

Alva Edison

Contenido

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	2
1.1. Introducción	2
1.2. Identificación del problema	3
1.3. Antecedentes y justificación	3
1.4. Objetivos	5
2. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	6
2.1. Estándares de comunicación	6
2.1.1. Tecnologías inalámbricas	7
2.2. Estándar Zigbee	8
2.2.1. Topologías	9
2.3. Módulos Xbee	10
2.4. Estándar IEEE 802.15.4	11
2.5. Redes de sensores inalámbricos	12
2.6. Minería, contexto técnico y social	12
2.6.1. Gases Nocivos en Minería	12
2.6.2. Metano	13
2.6.3. Monóxido de Carbono	13
2.6.4. Nitrógeno	13
2.6.5. Oxido Nítrico	14
2.7. Monitoreo convencional de gases explosivos en la explotación minera	14
2.8. Accidentalidad en las minas subterráneas	14
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	17
3.1. Implementación de tarjetas modulares	17
3.1.1. Microcontrolador PIC 16F877a	17
3.1.2. Módulos Xbee-PRO 900 DigiMesh	18
3.1.3. Sensor de gas metano TGS 2611	21
3.1.4. Sensor de dióxido de carbono CDM 4161	22
3.1.5. Sensor Auxiliar	23
3.1.6. Regulador LD1117	23
3.1.7. Baterías YSD 998	24
3.1.8. Salida AC del módulo	24
3.1.9. Salidas DC del módulo	25
3.1.10. Diseño de tarjetas modulares	25
3.2. Optimización del consumo de energía y configuraciones eficientes	27
3.2.1. Configuración de la red	27
3.2.2. Configuración modo API	27
3.2.3. Configuración canales análogos	28
3.2.4. Modo sleep	28

3.3.	Diseño del servicio web	29
3.3.1.	Porque Python	29
3.3.2.	Porque Django	31
3.3.3.	Manejo de URLS	32
3.3.4.	HTML	33
3.4.	Plataforma de desarrollo	33
3.4.1.	Beaglebone black	33
3.4.2.	Implementación del servidor web	33
3.4.3.	Servidor apache	36
3.5.	Identificación de datos	36
3.5.1.	Comunicación serial	36
3.5.2.	Identificación de la trama de cada módulo	37
4.	RESULTADOS OBTENIDOS	39
4.1.	Caracterización de los módulos de sensado inalámbrico	39
4.2.	Optimización del consumo de energía mediante tiempos de muestreo y configuraciones eficientes	41
4.3.	Desempeño del servidor web	42
4.4.	Caracterización del sistema en campo	45
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	49
	BIBLIOGRAFÍA	49

Lista de Figuras

2.1. Principales características de una red inalámbrica	8
2.2. Clasificación de topologías Zigbee	10
2.3. Tipos de antenas para Xbee	11
2.4. Índices de accidentalidad en los últimos 14 años	15
2.5. Reporte de emergencias a la Agencia Nacional Minera durante el periodo 2012-2013	15
2.6. Causas de accidentes reportados a la Agencia Nacional Minera durante el periodo 2012-2013	16
2.7. Índices de accidentalidad por departamentos durante el periodo 2012-2013	16
3.1. Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador	19
3.2. Sensor y esquemático de conexión del sensor TGS 2611	21
3.3. Sensor de dióxido de carbono CDM 4161	22
3.4. Batería YSD 998 con accesorios	24
3.5. Diseño de PCB en proteus	25
3.6. Diseño de la tarjeta para modulo de sensado inalámbrico de gases en minería	26
3.7. Configuración de la red	28
3.8. Grafico comparativo entre lenguajes de programación	30
3.9. Administrador de Django	32
3.10. Principales componenetes de la tarjeta de desarrollo Beaglebone	35
3.11. Interfaz web para el sensado de gases en minería	35
3.12. Traducción de direcciones de red para subir la página a internet	36
4.1. Módulo de sensado de gases fase I	40
4.2. Módulo de sensado de gases fase II	40
4.3. Interfaz web de los datos tomados en la galería 1 mina Sena morca Sogamoso	43
4.4. Interfaz web de los datos tomados en la galería 2 mina Sena morca Sogamoso	43
4.5. Historial del comportamiento de la batería galería 1	44
4.6. Historial del comportamiento del sensor de metano galería 2	45
4.7. Módulo implementado en la galería 1 estado en operación normal	46
4.8. Alarmas luminosas diseñadas	47
4.9. Módulo galería 1	47
4.10. Módulo galería 2	48

Lista de Tablas

2.1. Niveles de gases permisibles en minería subterránea	12
3.1. Características PIC 16F877A	18
3.2. Descripción de pines del Xbee-PRO 900 DigiMesh	20
3.3. Características técnicas del sensor TGS 2611	22
3.4. Características Técnicas del sensor CDM 4161	23
3.5. Características Beaglebone black	34
3.6. Descripción de trama de datos Xbee	38
4.1. Caracterización de consumo de energía de los módulos de sensado inalámbrico	42

Lista de Anexos

ANEXO 1. Guía de usuario Tarjeta de desarrollo BeagleBone	CD
ANEXO 2. Guía de usuario módulos Xbee.	CD
ANEXO 3. Hoja de datos sensores TGS 2611 y CMD 4162a	CD
ANEXO 4. Hoja de especificaciones PIC 16F877a, LD117 y TIP 122	CD
ANEXO 5. Instalador Software X-CTU	CD

Capítulo 1

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. Introducción

El desarrollo de la industria colombiana esta enmarcado con la aparición de las máquinas de vapor y las calderas en el siglo xx, razón por la cual la explotación minera se ha convertido en una de las fuentes energéticas de mayor impacto, cobrando mayor importancia en los últimos años con el apoyo del gobierno, el cual dio origen al Plan Nacional Minero 2007-2010 coordinado por la Agencia Nacional Minera fomentando la explotación minera como una actividad lucrativa enfocada al aumento de la exportaciones, pese a los esfuerzos de estas entidades siguen siendo visibles factores como la falta de seguridad industrial y salud ocupacional para los mineros.

Las difíciles condiciones de seguridad industrial dentro del sector minero se ven reflejadas en los altos índices de accidentalidad y riesgos que afectan directamente a los trabajadores, esto se debe en gran parte a la situación inestable y cambiante que se presentan dentro de las minas, estos ambientes se convierten en lugares propicios para la conformación de atmosferas explosivas como un detonante invisible y silencioso para el cual existen limitados mecanismos de detección.

Actualmente la detección de gases explosivos se realiza de forma manual, el operario es el encargado de recorrer la mina y alertar de los niveles de estos gases, sin embargo estos métodos tradicionales de medición otorgan una barrera para el análisis de ocurrencia de riesgos de accidentes como contaminación, envenenamiento, sofocamientos o explosiones por concentraciones excesivas de estos gases, los esfuerzos tecnológicos se centran en la búsqueda de soluciones autónomas para el sensado y alerta de estos gases, una visión interesante es el manejo de información por red de sensores inalámbricos basada en el protocolo Zigbee [1].

Este trabajo pretende desarrollar un sistema inalámbrico de monitoreo y sensado de gases explosivos con servicio web en tiempo real, el sistema está compuesto por módulos configurados en una red de sensores dispuestos en las galerías internas de la mina, cada uno estos módulos está en la capacidad de recibir señales provenientes de sensores de metano, dióxido de carbono y un sensor auxiliar que depende de los estudios que se le realicen a la mina, además cuenta con un módulo Xbee encargado de la transmisión de los datos que entreguen los sensores, finalmente se realiza la conexión del módulo más externo con una tarjeta de desarrollo BeagleBone encargada de la visualización de los datos en una plataforma realizada en Python.

1.2. Identificación del problema

Colombia cuenta con múltiples recursos naturales aprovechables los cuales se han venido siendo explotados con una gran informalidad y descuido. Esto debido a la falta de soluciones tecnológicas ofrecidas por el sector para aplicación específica, sumado con los elevados costos de producción hace que esta forma artesanal se convierta en la manera de subsistencia para muchas explotaciones minerales.

En Boyacá se tienen grandes reservas de carbón, sin embargo, uno de los mayores problemas con los que cuentan estas minas es la falta de condiciones de seguridad para los trabajadores, ya que en muchas ocasiones estos se enfrentan a condiciones de alto riesgo que perjudican su salud e incluso su vida. Uno de los temas más álgidos que enfrentan estas minas es el sensado de los gases que se producen en la explotación del mineral, los instrumentos con los que se realiza este sensado son costosos y en general los propietarios de las minas no cuentan o tienen un número insuficiente de estos dispositivos. Por otra parte, deben ser maniobrados por una persona esto implica que para tomar lectura se debe recorrer la mina para verificar los niveles de intensidad de gas, lo que lo convierte en un trabajo bastante dispendioso y peligroso, debido a que los niveles de gases cambian con bastante regularidad.

Si una persona “un supervisor” está monitoreando desde el exterior la acumulación de gases, los accidentes podrían ser prevenidos. Para ello la comunicación debe ser rápida y eficiente porque la vida de una persona dentro de una mina u otro campo confinado se puede poner en riesgo en cuestión de segundos, debido a la reducción del oxígeno o la presencia de metano que al contacto con chispa eléctrica puede generar una explosión. En Colombia las labores subterráneas se rigen bajo el decreto 1335 de 1987, que establece las velocidades mínimas para el aire que puede circular al interior de las minas, así como los valores límites permisibles para los gases que se generan en la explotación. En el artículo 26 se establecen los niveles de gases permitidos para el trabajo en una mina dentro de los que se encuentran: metano CH_4 , dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico H_2S , anhídrido Sulfuroso SO_2 , óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno. Además establece que ningún lugar de trabajo bajo tierra, debe ser considerado apropiado para laborar o para pasar por él si su atmósfera contiene menos del 19 % volumen de oxígeno [2].

1.3. Antecedentes y justificación

Una de las preocupaciones más grandes para la industria ha sido garantizar la preservación de vidas humanas, haciendo énfasis en campos donde se presentan una gran cantidad de riesgos y factores que alteran el desarrollo normal del trabajo. Entre los lugares que presentan riesgo para la vida humana se encuentran las minas subterráneas especialmente las de carbón, en la actualidad el 95 % de las minas subterráneas de carbón en Colombia no cuentan con un sistema de detección de gases en tiempo real, lo que origina que se presenten explosiones debidas a la concentración de metano. Estos accidentes repercuten en la pérdida de vidas humanas como es el caso de la mina de carbón San Fernando en el municipio de Amaga (Antioquia Colombia) en Junio del 2010 donde murieron 73 mineros.

Por esta razón, desde hace tiempo se ha venido desarrollando sensores que permite identificar la presencia de gases explosivos y riesgo al interior de los túneles. Sin embargo, estos sistemas dependen de que un trabajador esté tomando muestras esporádicamente en el lugar de trabajo. Con las redes de sensores inalámbricos (WSN, *wireless sensor networks*,) se logra a través de tecnología de comunicaciones inalámbrica interconectar nodos, conjuntamente con un router se logra cubrir los frentes de explotación [3].

Una de las aplicaciones hechas en el campo de las WSN es el desarrollado en [4], donde se utiliza la detección múltiple de gases explosivos, procesando y analizando los cambios que se toman de la muestra en tiempo real. Durante el desarrollo del producto se concluyó que el prototipo no solo funcionaba como elemento didáctico, sino que podría llegar a ser rentable y efectivo al aplicarlo en entornos como el de la minería. Otro dispositivo que merece la pena resaltar es el desarrollado en la india [5], el cual implementa

un sistema para la detección de gases tales como metano y monóxido de Carbono, mediante la aplicación de WSN el sensado se hace en forma secuencial, se realiza un sistema de conmutación que permite el intercambio de la instrumentación del sensor, cuando el sensor toma una muestra del gas este envía una señal modulada en frecuencia que es directamente proporcional al nivel de toxicidad del gas, dentro del sistema propuesto se establecen una serie de rangos tanto para las frecuencias como para los niveles de toxicidad de los gases a detectar, cuando la señal es recibida por el demodulador existe también una parte de acondicionamiento, se utiliza un conversor de frecuencia a voltaje, es decir, en el demodulador se tendrán unos valores de tensión que son acordes a los niveles de concentración de gases en el sitio de la ubicación del sensor.

Uno de los aspectos más importantes a la hora de implementar una red de sensores inalámbricos es poder establecer la tecnología a utilizar en la comunicación, ya que de esto depende el costo y las limitaciones de proyecto. Por esta razón se está trabajando en tecnologías inalámbricas que brinden excelente confiabilidad y ofrezcan consumos de energía eficientes. Digi internacional ha creado tres versiones de módulos transceiver inalámbricos los cuales usan el protocolo 802.15.4, autorizado por la IEEE que ofrecen grandes ventajas como bajos consumos de energía, transmisión confiable, y soporte a configuraciones específicas como temporizador de sueño entre otros. Durante el desarrollo de proyecto se observó que funciona correctamente para detección de gases en una mina y esto principalmente debido a su flexibilidad de operación, ya que estos pueden comunicarse entre sí y obedecer órdenes de un nodo maestro [6].

Una área de aplicación interesante de las redes WSN son las redes de geosensores [7] para el monitoreo del entorno ambiental, los cuales se han desplegado en un área geográfica amplia y pueden ser configurados de modo que todos realicen la misma función o que cada uno realice una función específica de acuerdo a los requerimientos, estos se ubican en distintas zonas conectando nodos. Estos sistemas de monitoreo se desarrollan para detectar de manera anticipada la ocurrencia de fenómenos naturales.

Con este proyecto se pretende llegar a conocer en tiempo real el nivel de toxicidad al interior de una mina mediante la instalación de sensores en cada uno de los frentes de trabajo con el fin de evitar accidentes que comprometan la integridad física de los mineros. Todo debe estar enmarcado por leyes y normas, las cuales estandarizan todos los gases y niveles. El proyecto está enmarcado dentro del decreto 1335 de 1987 en el cual se reglamentan acerca de las condiciones mínimas de trabajo [2].

1.4. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo y sensado de gases explosivos en minería con servicio web en tiempo real fase II.

Objetivos Especificos

- Mejorar el diseño e implementar tarjetas modulares para instrumentación y acondicionamiento del sensado de gases tóxicos en minería.
- Optimizar el consumo de energía para los nodos determinando las ubicaciones ideales y tiempos de muestreo, así como la utilización sistemas de potencia con mayor autonomía así como configuraciones eficientes.
- Desarrollar un servicio web simple en software libre (Python) para la visualización de los niveles de gases tóxicos, además del nivel de carga de las baterías que alimentan cada una de las tarjetas modulares.
- Realizar pruebas de campo para determinar la confiabilidad del sistema

Capítulo 2

FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.1. Estándares de comunicación

Las comunicaciones inalámbricas dieron sus primeros pasos cuando Rudolf Hertz descubrió la propagación de ondas electromagnéticas, que ya se habían mencionado en las famosas ecuaciones de Maxwell, después se iniciaron los estudios pertinentes para hallar las principales utilidades, es allí cuando Nikola Tesla revolucionó al mundo con su bobina de tesla que permitía crear grandes descargas eléctricas que transmitían la electricidad de manera inalámbrica por unos cuantos metros, este descubrimiento fue crucial ya que utilizaba las ondas electromagnéticas [8] para la propagación de electricidad, En 1894 Guglielmo Marconi construyó los primeros emisores y receptores que podían enviar señales telegráficas a cientos de metros utilizando como medio las ondas electromagnéticas, todo esto de la mano de la sustentación teórica de las leyes de Maxwell, sin embargo surgieron dudas acerca de la propagación de las ondas electromagnéticas en la curvatura de la tierra fue cuando se llegó a la conclusión de que la tierra está rodeada por una capa llamada ionosfera que está compuesta de electrones que hacen reflejar las ondas electromagnéticas, lo cual hace que las señales tomen la curvatura de la tierra y siga su curso hasta llegar al receptor [9]. En este tipo de comunicaciones solo se lograban enviar señales telegráficas es decir pulsos, sin embargo esto revolucionó la transmisión de comunicaciones a grandes distancias, al crear el código morse, un código en el cual se transmitían mensajes enviando pulsos. Sus principales aplicaciones fueron las comunicaciones militares.

Con estos principios básicos se llegó a la revolución de las comunicaciones de dispositivos, ya que se lograban establecer comunicaciones sin un medio como el cableado, lo que reduciría sustancialmente la implementación de enlaces de comunicación entre un emisor y un receptor. Entre las ventajas más relevantes de las comunicaciones se encuentran escalabilidad, flexibilidad, acceso a la información, costo etc.

Escalabilidad: Las tecnologías inalámbricas son escalables, ya que pueden ser configurados de acuerdo a los requerimientos, para ello es que las redes inalámbricas manejan topologías que son básicamente la forma de organización de receptor y emisor, para tener ciertos beneficios de dicha configuración.

Flexibilidad: La flexibilidad de una red inalámbrica se ve directamente implícita al no necesitar de un medio cableado para su funcionamiento, ya que permite rediseñar las estrategias de distribución de la información tanto a distancia como a dispositivos conectados a esta red.

Acceso a la información: En la comunicación inalámbrica pueden existir un gran número de receptores de la información, esto es debido a que por el canal de propagación pueden viajar ondas electromagnéticas las cuales pueden llegar a distintos receptores, esto se puede llegar a identificar tanto ventaja como o desventaja, dado que se hace necesario que la información difundida llegue a todos los usuarios conectados a la red, sin embargo existen aplicaciones privadas en las cuales se requiere que haya una privacidad con la información difundida. Para esto se realizan encriptaciones de protocolos o uso de tecnologías a diferentes frecuencias.

Costo: Con relación al costo de implementar una tecnología inalámbrica se deben tener en cuenta factores como: distancias, condiciones físicas del terreno, cantidad de información, velocidad de información, pérdidas de la información, etc. Ya que no siempre implementar una red inalámbrica es la opción mas económica, ya que no siempre instalar una tecnología inalámbrica es la más viable ni la menos costosa.

2.1.1. Tecnologías inalámbricas

Algunas de las tecnologías más conocidas inalámbricas son WIFI, Bluetooth, Wimax, Zigbee, NFC, GSM, cada una de ellas tiene diferentes condiciones y son implementadas para suplir la necesidades en diferentes aplicaciones. Para esto se realiza una medición de los parámetros más relevantes mostradas en la figura 2.1, dentro de los cuales están contenidos aquellos que caracterizan a las redes inalámbrica por su rendimiento en su entorno desarrollado [10].

- **WIFI:** Las tecnologías WIFI son en realidad una gran cantidad de protocolos, que cumplen con las condiciones del estándar IEEE 802.11, que permiten la transmisión de datos entre dispositivos conectados a la red, teniendo como restricciones las distancias que cubre la red. Fue inicialmente diseñada para la transmisión de datos entre computadores pero desde hace unos años se ha ido utilizando para la transmisión de datos por internet. utilizando routers conectados vía cable que reciben la transacción de datos, y los dispositivos finales se conectan de manera inalámbrica al sistema [11] .
- **Bluetooth:** Esta es una tecnología de comunicación inalámbrica de radio frecuencia que trabaja en la banda de 2.5 GHz, se caracteriza porque es de corto alcance y fue desarrollado para dispositivos personales tales como teléfonos celulares, PDA, portátiles, módems, entre otros, siempre y cuando su distancia no supere los 10 m. Dependiendo de las locaciones en donde se realice la comunicación, su principal enfoque es la transferencia de datos y archivos lo cual depende de la ubicación donde se realice la comunicación. Una de sus principales características es que no se requiere que tenga línea de vista, ya que las ondas emitidas pueden atravesar objetos sólidos.
- **Wimax:** La tecnología wimax corresponde al estándar 802.16, que básicamente es una red inalámbrica diseñada para la transmisión hasta de 70 Mbps con un cobertura de hasta de 50 km, podría llegar a conectar con miles de accesos a la internet, ya que tiene una gran ventaja de que no necesita de que haya línea de vista entre emisor y receptor, con lo que podría llegar a reemplazar al estándar 802.11 correspondiente a WIFI pero aumentando sus costo de implementación citecincuentacinco.
- **Wimesh:** Esta es una de las tecnologías que últimamente han revolucionado las comunicaciones inalámbricas. Este tipo de red ofrecen ventajas de acuerdo a su configuración, como lo son la redundancia de comunicación presente en la configuración árbol, otra de las ventajas importantes sucede cuando se configuran en modo punto a punto (un único emisor y un único receptor), si el receptor no está al alcance el sistema emite señales buscando posibles puentes entre nodos hasta llegar al destino de la información. Los Zigbee constituyen una de las tecnologías Wimesh citecincuentacinco.
- **Near field communication:** Es una tecnología de comunicación inalámbrica entre dispositivos que contengan las etiquetas, es especialmente dirigida a la comunicación entre dispositivos móviles, lo que lo hace que sea de corto alcance, el sistema consta de un iniciador y un objetivo, en esta configuración cualquier dispositivo puede actuar tanto como como objetivo o como iniciador. En los últimos años se han ido implementando en dispositivos como televisores, teléfonos móviles, cámaras fotográficas etc [12].

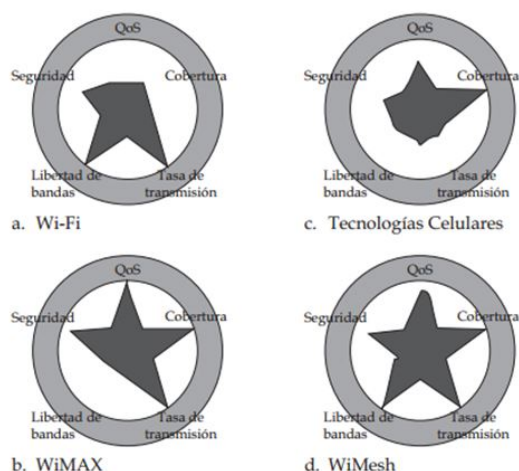


Figura 2.1: Principales características de una red inalámbrica

2.2. Estándar Zigbee

Zigbee es un protocolo inalámbrico de comunicaciones basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*) diseñado por Zigbee Alliance, establece un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante, dentro de los promotores se encuentran más de 100 compañías como Motorola, Mitsubishi, Philips, Samsung, Honeywell, Siemens, entre otras [13], [14].

Su objetivo es habilitar redes inalámbricas con capacidades de bajo consumo energético y de bajo costo, que funcionen vía radio y de modo bidireccional, de fácil integración entre sus nodos, con capacidades de configuración en modo sueño (Sleep), que reduce su consumo de energía al orden de los microamperios. Esta tecnología utiliza la banda de frecuencias ISM (*Industrial Scientific Medical*) para uso industrial, científico y médico con frecuencias de 2.4 GHz siendo la más utilizada en el mundo, ya que es de uso sin licencia, su velocidad de transmisión es de 250 Kbps, con capacidad de operar en redes de gran densidad, aumentando la confiabilidad esto se debe a que cada módulo Zigbee tiene un identificador de red único, utiliza un protocolo de comunicación multi-salto que puede establecer comunicación entre dos nodos aun cuando estos se encuentran fuera del rango de transmisión [15].

Funciona en topologías de estrella, malla y árbol, en la topología estrella el coordinador está en el centro de la red, los routers y los dispositivos finales son controlados por el nodo coordinador. En la topología árbol los dispositivos finales pueden unirse unos con otros por medio de routers, y en la topología malla los routers pueden comunicarse entre sí lo cual permite unir a los dispositivos finales. Según su funcionalidad en una topología estos se clasifican en coordinador Zigbee (ZC), Router Zigbee (ZR) y dispositivo final (ZED). El coordinador se encarga de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para comunicarse entre ellos generalmente hay uno por red. El Router Zigbee (ZR) en este caso conecta dispositivos separados en la red, se vincula con el coordinador o con otro router. El dispositivo final (ZED) en este caso se comunica con un coordinador o un router, pero no se transmite información a otros dispositivos [14].

2.2.1. Topologías

Se distinguen 3 tipos de topología Zigbee, entendida esta como la forma de interconexión de los dispositivos en una red. Según como estén conectados estos dispositivos cumple un papel dentro de la red dentro de los que se puede distinguir:

- Coordinador Zigbee (Zigbee coordinator, ZC). Este dispositivo es el más completo ya que inicializa y controla la red, puede actuar como director de una red en árbol, así como servir de enlace a otras redes. También se encarga de gestionar las tareas de seguridad, puede almacenar información sobre la red y actuar como un centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.
- Router ZibBee (ZR). Estos dispositivos son los encargados de extender la cobertura de la red, gestionando nuevos caminos en caso de que la red experimentan congestión o se produzca la caída de algún nodo. Pueden conectarse directamente al coordinador o a otros routers.
- Dispositivo final (Zigbee end device, ZED). Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre, pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De este modo este dispositivo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías.

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

- Dispositivos de funcionalidad completa (FFD): Es capaz de recibir mensajes en formato estándar 802.15.4. Posee memoria adicional que los provee de la capacidad de computo. Puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen como interfaz con los usuarios.
- Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD): Tiene capacidad y funcionalidad limitadas, está pensado para realizar tareas simples en las que se envíen pequeñas cantidades de datos, solo pueden funcionar como dispositivos finales [14].

El estándar Zigbee soporta topologías en red, estrella, malla y árbol (ver figura 2.2) a cada red se le asigna un número de identificación PAN ID que les permite trabajar en zonas contiguas sin ocasionar colisión de datos. Las características de estas topologías son:

Topología en estrella

En esta topología la red se compone de un dispositivo de funcionalidad completa (FFD) que funciona como coordinador y varios FFD o RFD funcionando como dispositivos finales. Cada uno de ellos esta conectado a un coordinador, en esta configuración todos los datos de los dispositivos finales deben pasar antes por el coordinador, se recomienda que los dispositivos finales estén alimentados por baterías y el coordinador esté conectado a la red eléctrica ya que el consumo de energía es mayor. Uno de los inconvenientes que se tiene con esta red es que la expansión es muy limitada debido a que la red está limitada por el alcance del coordinador de la red.

Topología en malla

En este tipo de red se puede establecer conexión directa entre cualquier par de nodos, el coordinador está determinado por el primer Router que forme parte de la red. En este tipo de red presenta una mayor

fiabilidad en la transmisión de datos. En este tipo de topología se gana flexibilidad debido a la configuración de la red pero la complejidad de la red aumenta ya que la comunicación entre un par de dispositivos puede estar determinada por diferentes caminos lo que conlleva al aumento del cómputo que debe realizar la red.

Topología en árbol

Corresponde a un caso especial de la topología malla, los dispositivos en esta red están organizados de manera jerárquica, de tal manera que los routers son los encargados de encaminar los datos. Los routers están conectados a dispositivos hijos pero estos a su vez se pueden comportar como otros routers, esta topología se puede expandir de forma dinámica como se indica en [16].

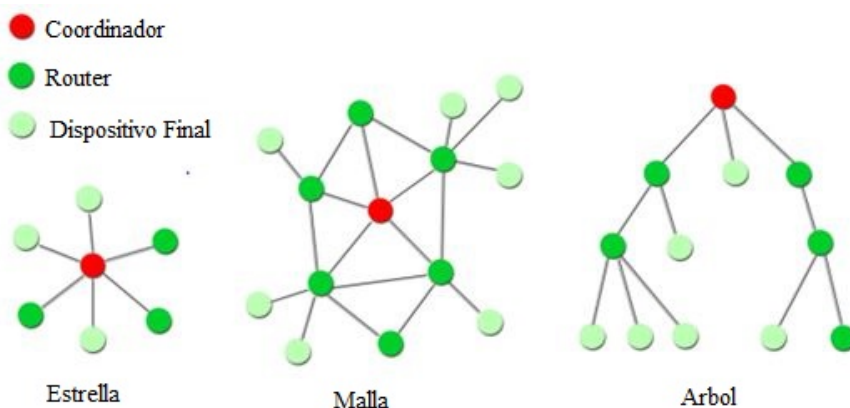


Figura 2.2: Clasificación de topologías Zigbee

2.3. Módulos Xbee

Los módulos Xbee son fabricados por la empresa MaxStream la cual forma parte de Digi International, son dispositivos resistentes al uso industrial con homologación Zigbee que permite a los usuarios disponer de la confianza de su buen desempeño en una red. La línea de productos Xbee se pueden encontrar en diferentes aplicaciones industriales y comerciales como sensores remotos, control y manipulación de robots etc. Los módulos Xbee proveen 2 formas de comunicación, transmisión serial transparente (Modo AT) y el modo API que permite el uso de tramas de datos con cabeceras que aseguran la entrega de datos.

Los módulos tienen 6 convertidores de tipo análogo-Digital y 8 entradas digitales además de un pin de recepción y transmisión de datos seriales, ofrecen una velocidad de comunicación desde 1200 baudios hasta 115200 baudios, están diseñados con la capacidad de transmisión de datos desde 100 m para Xbee serie 1 y 2 y 1.6 Km para los módulos Xbee Pro. Los Xbee están en la capacidad de configurar su propia red y tienen la característica de ser módulos microprocesados con lo cual tiene solucionado los problemas de fallo de trama, ruido etc.

Actualmente en el mercado se encuentran diferentes versiones, los módulos de la serie 1 son los más fáciles de trabajar ya que no necesitan ser configurados, permiten conexión punto a punto. Los módulos de la serie 2 deben ser configurados antes de empezar a utilizarlos, pueden funcionar en modo API o transparente (solo envía el dato) y permite la conexión en malla. El mayor problema con estos módulos es que presentan

incompatibilidad con los demás versiones. Finalmente los módulos de la serie 900 MHz, estos están en la capacidad de ejecutar 2 tipos diferentes de firmware (sistema operativo), el firmware DigiMesh y el punto a Multipunto cuentan con una mayor potencia de transmisión que cubre una línea de visión de hasta 1.5 Km, en espacios confinados y 6.5 km, en línea de vista. En todos los casos el alcance de transmisión está sujeto a la antena que se le incorpore [17].

La selección de la antena depende de la ganancia que se requiera para la aplicación, cada módulo cuenta con antenas de alambre, con patrón de radiación omnidireccional, la distancia de transmisión es aproximadamente la misma en todas las direcciones. Otro tipo de antena con las que cuentan los módulos es la antena tipo chip, este es un chip cerámico pequeño y robusto con patrón de radiación cardiode (en forma de corazón) la señal se atenúa en muchas direcciones. Otro tipo de antena es la PCB, esta antena se introdujo en los módulos S2B Xbee-PRO este tipo de antena viene instalada directamente en el circuito del Xbee, se compone de una serie de caminos que forma un patrón fractal. La antena tipo conector U.FL es pequeña, frágil y se utiliza con un cable de conexión corto, finalmente la antena que se incorpora a los módulos de potencia es la RPSMA esta se utiliza en los módulos con ganancias altas para transmisión a grandes distancias [18].

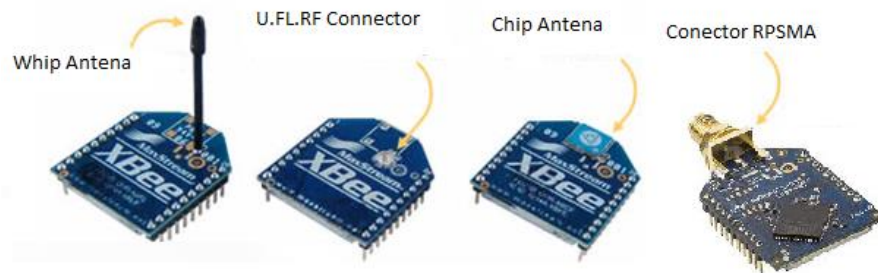


Figura 2.3: Tipos de antenas para Xbee

2.4. Estándar IEEE 802.15.4

Esta norma define una capa de comunicación en el nivel 2 del modelo OSI (*Open System Interconnection*), que permite la conexión entre dos dispositivos. Fue creada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

Este protocolo se encuentra alojado en el nivel 2 de la OSI, o vínculo de datos. En esta parte la información (*Bits*) es gestionada y organizada para convertirse posteriormente en impulsos electromagnéticos (*Ondas*), cada bit a transmitir se modula en 4 señales diferentes lo que hace que la información que se transmite ocupe un ancho de banda más grande, pero que utiliza una densidad espectral de potencia baja, este estándar es similar a otras como el 802.11 comercialmente conocida como WIFI o el Ethernet común 802.3. La frecuencias de operación se dividen en 27 canales, organizadas en tres grupos diferentes.

- 868.0-868.6 MHz compuesto por 1 canal únicamente para Europa.
- 902.0-928.0 MHz compuesto por 10 canales dedicados a Estados Unidos.
- 2.40-2.48 GHz compuesto por 16 canales dedicados para el resto del mundo.

Una de las funcionalidades implementadas en el estándar 802.15.4 es la exploración de la energía del canal, que consiste en conocer la cantidad de ruido e interferencia que hay en uno o varios canales antes de previo uso, de esta manera se puede ahorrar energía al elegir canales libres. Además este protocolo está dotado con la capacidad de ahorro de energía mediante los ciclos de sueño que experimentan los transceptores, los cuales pueden estar durmiendo hasta un 99 % de la operación de trabajo, sin embargo los ciclos de sueño están determinados por la prioridad de la aplicación. Como se ilustra en [19].

2.5. Redes de sensores inalámbricos

El uso de sensores es de vital importancia en las industrias ya que permite monitorear y manipular magnitudes físicas presentes en un proceso, tradicionalmente este sensado se realiza mediante redes cableadas, con el avance tecnológico se ha venido incentivando el desarrollo de dispositivos de comunicación inalámbrica dispuestos en cualquier localización, cada vez de menor tamaño, autónomos y con consumo de energía eficiente, la versatilidad en la comunicación entre ellos y con dispositivos de mayor nivel, permite que se implementen en redes de sensores inalámbricos que realizan la interacción de una o más variables en distintas localizaciones, permitiendo tener una mayor certeza del comportamiento de la variable en distintas etapas y ubicaciones del proceso [20].

Según [21] una red de sensores se define como un conjunto de elementos autónomos (nodos) interconectados de manera inalámbrica, la red de sensores se distribuyen en un área específica y los nodos pueden ser estacionarios o móviles, una red de nodos móviles forman una red ad-hoc capaz de realizar el enrutamiento entre ellos. Dentro de las aplicaciones más comunes de una red de sensores se encuentra determinar un parámetro ambiental, detectar eventos, estimar parámetros, clasificar objetos, seguir trayectorias, etc.

2.6. Minería, contexto técnico y social

2.6.1. Gases Nocivos en Minería

El componente fundamental en la respiración de los seres humanos es el aire, que contiene un 21 % de oxígeno, un 78 % de nitrógeno y un 0.2 % de dióxido de carbono entre otros, esta correlación debe mantenerse fielmente para garantizar que haya una respiración celular, la cual es la encargada de la producción de energía de todo ser vivo. En algunos ambientes se presentan disminución de los porcentajes del aire así como la presencia de gases tóxicos que provienen de la reacción de algunos materiales, dentro de estos ambientes están los ambientes confinados, en los cuales se debe garantizar que los porcentajes de oxígeno no disminuyan del 19 %, ya que ocasionaría disminución de las capacidades motrices de la persona e incluso puede ocasionar la muerte. Uno de los ambientes confinados que más se conocen son las minas subterráneas, en las cuales se presentan la presencia de gases tóxicos, así como disminución de los porcentajes normales de aire, entre los gases más nocivos para la salud humana están: Metano CH_4 , dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono (CO), nitrógeno(N) [22], ver tabla 2.1.

Tabla 2.1: Niveles de gases permisibles en minería subterránea

Nombre del gas contaminante	Formula química	Porcentaje en volumen	Partes por millon
Dioxido de carbono	CO_2	0,5	5000
Monoxido de carbono	CO	0,0025	25
Acido sulfídrico	H_2S	0,0015	15
Anhidrico sulfuroso	SO_2	0,001	10
Oxido nítrico	NO	0,0035	35
Dioxido de nitrógeno	NO_2	0,0005	5

2.6.2. Metano

El metano es un hidrocarburo de formula CH_4 , este es un gas incoloro e inodoro, debido a sus principales características es utilizado como una fuente de energía pese a sus aplicaciones se encuentra en la lista de sustancias peligrosas (*hazardous substance list*), por ser altamente inflamable y explosivo al estar expuesto a ciertas condiciones climáticas, en la tierra existen varias fuente de emisión de metano, las cuales van desde procesos de descomposición anaeróbica de la materia, pasando por orígenes antropogénicos, como lo son actividades agrícolas, y por ultimo llegando a la extracción de recursos naturales como lo son las minas de carbón, en todos estos casos el metano contribuye con el 16 % de los gases de invernadero.

El metano puede ser liquido si está bajo presión y gaseoso si se encuentra en estado normal, cuando se encuentra en estado líquido puede ser sumamente nocivo para la salud provocando un congelamiento en la parte que entra en contacto, si se encuentra en estado gaseoso dependerá de su concentración en el aire, para saber si es o no potencialmente peligroso. Para esto se han establecido los siguientes rangos, si se encuentra en estado menor al 4 % puede ocasionar ardor en la piel sin ninguna consecuencia nociva para la salud de la persona, si la concentración está dentro de 5 % hasta un 15 % está muy propenso a ocasionar una explosión, siempre y cuando haya alguna fuente de chispa que lo encienda, si la concentración es mayor al 15 % la mezcla ya no es explosiva pero inicia a ser asfixiante, ya que en grandes cantidades el metano tiende a disminuir el oxígeno, el cual no debe ser menor al 19 % [23].

Cerca de 500 millones de toneladas métricas de gas metano ingresan a la atmosfera cada año, esto es debido principalmente a actividades antropogénicas, como son la agricultura, y otras debido al proceso de descomposición de animales o plantas, es por ello que una de las fuentes abundantes de metano son los rellenos sanitarios, los cuales lo producen por una acción anaeróbica de microorganismos [24].

Una de las mayores fuentes de metano es la que ocurren en el proceso de extracción del carbón, ya sea en minas subterráneas o minas a cielo abierto, el metano se puede producir en la extracción, procesamiento, almacenamiento y transporte del carbón, en este caso es más conocido como grisú que su componente principal es el metano.

2.6.3. Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro y es altamente toxico cuando se presentan en grandes concentraciones, en minería se produce debido: a la combustión del diésel, la detonación de explosivos, e incendios provocados por el gas grisú entre otros. Es toxicó debido que al ser inhalado, interfiere con el transporte normal de oxígeno, ya que la hemoglobina tiene una preferencia por este gas, y esta es la encargada de llevar oxígeno a los tejidos celulares, es por esto que en mínimas cantidades es peligroso, ya que ese transportaría monóxido de carbono en vez de oxígeno, lo que ocasionaría un daño irreparable especialmente a los tejidos del cerebro, esta sintomatología es conocida como carboxihemoglobina, un envenenamiento agudo con monóxido de carbono se presenta cuando se expone a concentraciones superiores a 400 ppm, teniendo hechos irreversibles, y dependiendo del tiempo de exposición puede llegar hasta la muerte, cuando se es expuesto a concentraciones menores a 400 ppm se produce un envenenamiento crónico en la cual el cuerpo desecha en un tiempo aproximado de 8 horas, en esta ocasión puede producir síntomas como mareos dolores de cabeza entre otros [25].

2.6.4. Nitrógeno

El nitrógeno es un gas inodoro, incoloro e insípido, este se produce debido a la descomposición de materias orgánicas así como con la detonación de explosivos, y es altamente peligroso cuando ocurre desgasificación del grisú, ya que el grisú (*metano*) tiene una composición de nitrógeno cerca del 40 %, los mayores riesgos que se producen es cuando en la composición química de aire este supera los 88 %, cuando los niveles son

menores a 88 % pero mayores a 78 % produce un sofocamiento en el organismo, el cual no incide directamente en la vida del trabajador [22].

2.6.5. Óxido Nítrico

El óxido nítrico es un gas incoloro de un olor bastante fuerte y se forman en la minas debido a la combustión y detonación de explosivos, este gas disuelve la humedad de los pulmones, en exposiciones mayores pueden ocasionar edemas en los pulmones, además de ello reduce la cantidad de oxígeno que ingresa a los pulmones, ocasiona dolores de cabeza intensos y en grandes cantidades puede ocasionar colapsos e incluso la muerte [26], el límite legal para exposiciones en el aire son 25 ppm en una jornada de 8 horas de trabajo.

2.7. Monitoreo convencional de gases explosivos en la explotación minera

En la explotación minera actual el monitoreo de gases explosivos es muy escaso o simplemente no se realiza esto debido al alto porcentaje de minería ilegal con el que cuenta el país, sumado al mínimo control que se realiza por parte del estado esto conlleva a que las medidas sean omitidas por los propietarios de las minas, generalmente donde se realiza el monitoreo de gases la periodicidad está determinada por el cambio de turno laboral el cual se realiza cada 12 horas, el método es simple un operario recorre la mina llevando un multidetector de gases el cual va registrando los niveles de los gases explosivos en caso de que alguno sobrepase el umbral este emite una alarma para alertar sobre la imposibilidad para trabajar, después de que el operario termina el recorrido se vuelve a la oficina de control para conectar el dispositivo a un computador que descarga el reporte del recorrido en un archivo MS-Excel en el que se tiene un historial de los niveles del gas en el tiempo [1].

Como se puede notar el tiempo de muestreo es muy grande en comparación con la generación repentina de los gases, teniendo en cuenta que las mediciones se realizan antes y después de la excavaciones y no se está monitoreando en el momento que se perfora el cual es el momento justo cuando pueden generar atmosferas explosivas, sin embargo cabe resaltar que aun cuando se este monitoreando que el nivel de los gases estén entre los rangos permitidos se puede generar una mezcla explosiva debido a la combinación repentina de algunos gases.

Un factor importante que se presenta en la explotación minera es el consumo de energía derivado de un proceso continuo de ventilación al que está expuesta las minas, esta es la forma tradicional con la se realiza el proceso de extracción de materiales sin embargo esto genera un alto consumo ya que así no exista riesgo dentro de las minas gigantes turbinas están continuamente ventilando lo que genera que le sector minero represente el 34.9 % del uso total eléctrico, devengando además del gran consumo de energía altos presupuestos económicos para cubrir estos consumos de energía eléctrica.

2.8. Accidentalidad en las minas subterráneas

En la actualidad la explotación minera se considera como una actividad de alto riesgo para los trabajadores, esto se debe a la falta de mecanismos de detección de los diferentes riesgos que se presentan en el interior de la minas, las medidas preventivas permiten evitar accidentes fatales que derivan en la pérdidas humanas, materiales y daños sociales, sin embargo los esfuerzos no son suficientes, Colombia está considerado como

Accidentalidad en las minas subterráneas

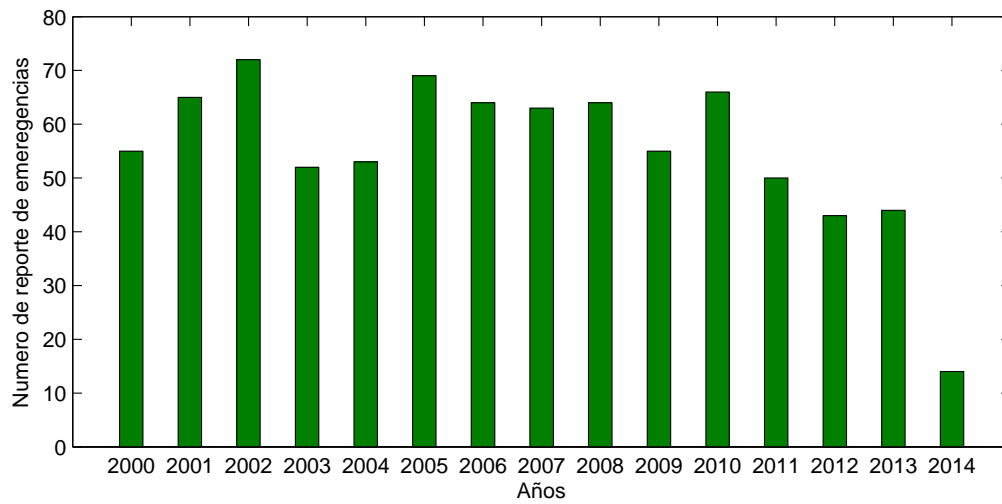


Figura 2.4: Índices de accidentalidad en los últimos 14 años

el primer productor de carbón en América Latina y el décimo en el mundo, sin embargo estos índices de actividad viene acompañados con altos índice de accidentalidad como se muestra en la figura 2.4

En Colombia durante el periodo 2012 a 2013 se reportaron a la agencia nacional minera un total de 74 emergencias, las cuales generaron como resultado 25 personas ilesas, 39 heridas y 86 fallecidas, los mayores índices de accidentalidad se presentan en Nobsa, Ubaté y Amaga tal y como se muestra en la figura 2.5

Reporte de emergencias a la Agencia Nacional Minera

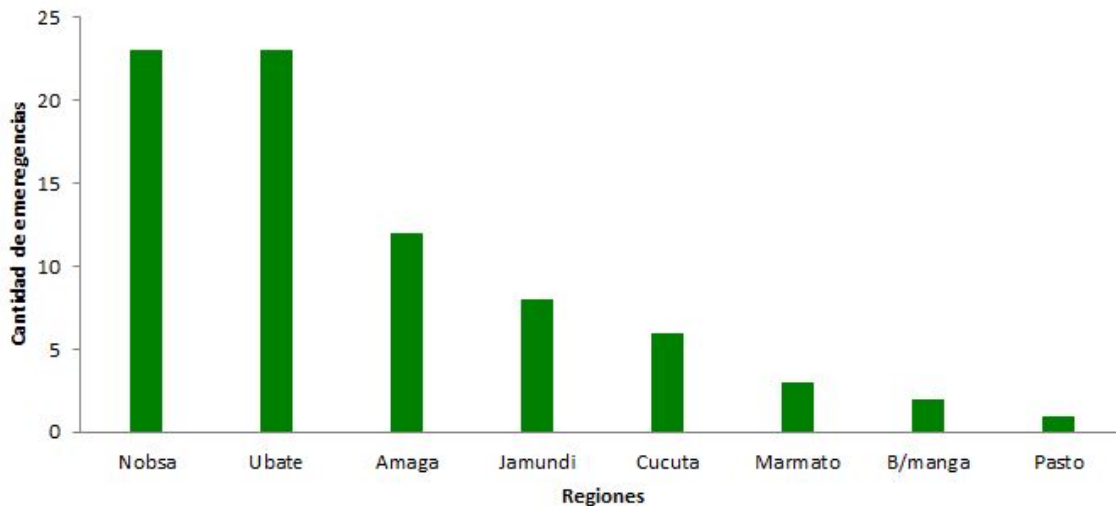


Figura 2.5: Reporte de emergencias a la Agencia Nacional Minera durante el periodo 2012-2013

De acuerdo al análisis estadístico que maneja la agencia nacional minera se determinó que el mayor número de accidentes se presenta por derrumbe, representado en un 37% seguida de los actos inseguros

19 %, causas electromecánicas 12 % y accidentes por inhalación de gases un 10 %, en muchas ocasiones la acumulación de gases se convierte en un factor crítico ya que además de la inhalación se pueden presentar incendios lo que ocupa un 5 % de los accidentes, de manera más explícita se muestran en la figura 2.6

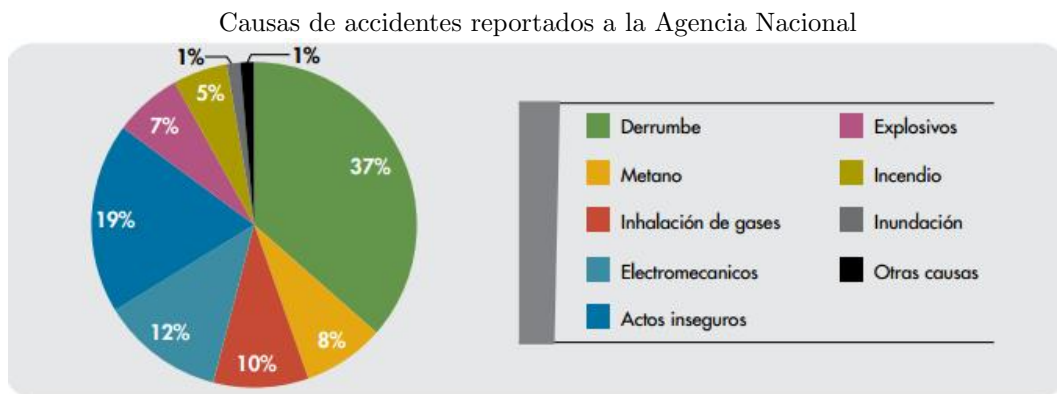


Figura 2.6: Causas de accidentes reportados a la Agencia Nacional Minera durante el periodo 2012-2013

De acuerdo al informe realizado por la agencia nacional minera los departamentos que presentan mayores índices de accidentalidad son Boyacá y Cundinamarca, esto se debe principalmente a que más del 50 % de la explotación minera es ilegal, el informe da cuenta que la minería es uno de los mayores generadores de muerte en estos departamentos en promedio cuatro mineros mueren al mes por causa de los efectos del ejercicio de la minería, estos datos más al detalle se representan en la figura 2.7, [27].

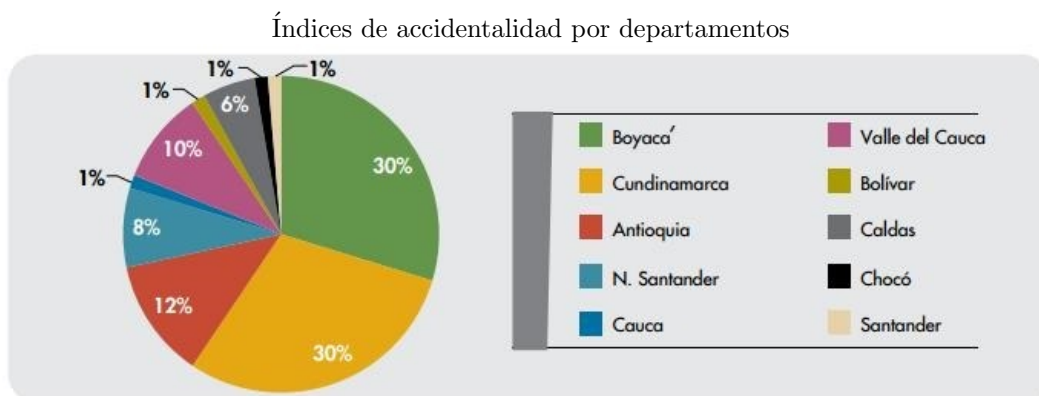


Figura 2.7: Índices de accidentalidad por departamentos durante el periodo 2012-2013

Capítulo 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Implementación de tarjetas modulares

Dentro de los objetivos del proyecto se contempla mejorar el diseño e implementar tarjetas modulares para el sensado de gases tóxicos en minería, de acuerdo a estos requerimientos el diseño del módulo se plantea desde dos ópticas distintas, el primero un sistema autónomo con capacidad de decisión, el segundo un sistema de conexión en red, desde estas dos ópticas se distinguen dos elementos principales un sistema de transmisión inalámbrica Xbee-pro DigiMesh 900 RF, y un microcontrolador PIC 16f877a encargado de la autonomía del módulo, bajo estas premisas cada una de las señales provenientes de los sensores y la batería se conectan tanto a los canales ADC del Xbee como a los del microcontrolador, el modulo cuenta con 2 sensores para la detección de gases en minería, un sensor de metano (Fígaro 2611) y un sensor de dióxido de carbono (CMD 4161a) además se deja un socket de conexión para un sensor auxiliar, para alimentación del módulo se cuenta con una batería YSD 998 conectada a una serie de reguladores fijos encargados de proveer el nivel de tensión necesario para los componentes dentro de la PCB, finalmente el modulo incorpora una alarma sonora, una alarma luminosa y una salida de habilitación AC. La descripción y función de los componentes electrónicos seleccionados se muestran a continuación.

3.1.1. Microcontrolador PIC 16F877a

En términos generales un microcontrolador se define como un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades fundamentales de una computadora, unidad central de procesamiento (CPU), Memoria y unidades de entrada salida, se considera como un sistema cerrado destinado a gobernar una sola tarea que no se puede modificar hasta ser reprogramado.

El Pic 16F877a es un microcontrolador de Microchip Technology fabricado en tecnología CMOS, su consumo de energía es muy bajo, posee la característica de que es completamente estático, de bajo costo y fácil acceso en el mercado, el consumo de corriente del microcontrolador para su funcionamiento depende del voltaje de operación la frecuencia y a las cargas que tengan sus pines, para un oscilador de 4 MHz en consumo es de aproximadamente 2 mA, puede entregar una corriente por cada uno de los pines de 25 mA con capacidad máxima por puerto de 200 mA, requiere un circuito externo que indique la velocidad a la que debe trabajar, este circuito se conoce como oscilador o reloj, puede utilizar cuatro tipos de oscilador RC (Resistencia y condensador), XT(Cristal), HS (Cristal de alta frecuencia), LP (Cristal de baja frecuencia y bajo consumo de potencia) [28]. Las demás características técnicas se muestran en la tabla 3.1.

El empaquetado que se escoge para el desarrollo del proyecto es el TQFP de montaje superficial, este costa de 44 pines ubicados en forma de cuadrado, la separación entre los pines es de 0.8 mm y distancia entre lados de 11.4 mm, a este dispositivo se conecta la salida de un regulador de 5 V, tierra, sensor de metano,

Tabla 3.1: Características PIC 16F877A

Característica	Valor
Frecuencia Máxima de operación	20MHz
Memoria de programa flash	8KB
Posiciones Ram de datos	368
Posiciones EEPROM de datos	256
Puertos E/S	A, B, C, D, E
Numero de pines	40
Interrupciones	
Contadores	3
Módulos de captura-comparación	2
Comunicaciones serie	MSSP,USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Set de instrucción	35
Longitud de la instrucción	14 bits
Arquitectura	Harvard
CPU	Risc
Canales PWM	2 de 10 bits
Ejecución en ciclo maquina	200ns por instrucción
Empaquetados	PDIP40, PLCC44,QFN44,TQFP44
Rango de voltaje de funcionamiento	4-5.5 voltios
Rango de temperatura de operación	-40 a +85 °C

sensor de dióxido de carbono, sensor auxiliar, nivel de batería, cristal de 4 MHz y la UART del Xbee. Con el fin de tener compatibilidad entre los datos del Xbee y los datos del PIC se realiza la configuración de este de tal manera que la referencia sea de 3.3 V y tierra, el sistema está diseñado de manera que se puedan realizar cambios en el programa del microcontrolador por lo tanto se tiene conexiones de los pines de programación hacia un socket de conexión con el programador.

El algoritmo ejecutado por el microcontrolador permite la lectura de cuatro canales análogos. Por el canal 0 ingresa la señal proveniente del sensor de metano, por el 1 la señal proveniente del sensor de dióxido de carbono, por el 2 la señal proveniente del sensor auxiliar y finalmente por el canal 3 ingresa el nivel de batería, cada uno de estos valores se almacenan en registros los cuales son procesador para determinar si en nivel de alguna señal es crítica. Si esto se cumple se activan pines de alarmas de lo contrario se realiza nuevamente la lectura de los canales análogos. El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 3.1.

3.1.2. Módulos Xbee-PRO 900 DigiMesh

La elección de este módulo radica en la flexibilidad que tiene para intercambiar datos en una red, puede ser configurado como dispositivo final, router o coordinador soportando topologías como punto a punto, punto a multipunto, estrella, malla y árbol, a pesar de tener unas reducidas dimensiones (25 mm x 27 mm) proporciona 6 entradas analógicas, 12 entradas-salidas digitales y dos salidas de PWM (*modulación de ancho de pulso*), todo esto encapsulado en 20 pines, para acceder a cada una de las funciones de los pines se debe configurar por software, las funciones de todos los pines se muestran en la tabla 3.2. Los módulos puede establecer ciclos de sueño coordinados en una red con un consumo de energía mínimo, además de la transmisión inalámbrica que poseen este tipo de dispositivos cuenta con pines de transmisión y recepción de datos, opera en la banda ISM de 900 MHz de frecuencia, posee un conector RPSMA para antena externa, las demás especificaciones técnicas son:

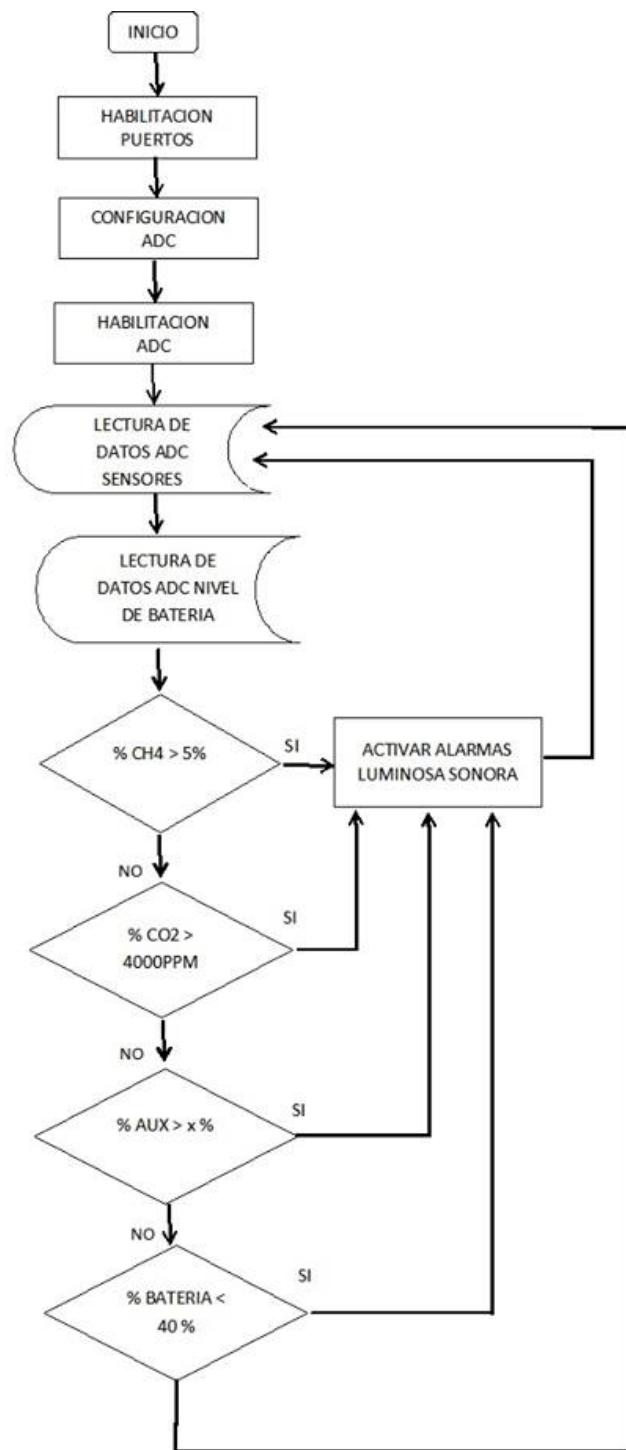


Figura 3.1: Diagrama de flujo del algoritmo ejecutado por el microcontrolador

- Voltaje de alimentación de 3.3 VDC
- Alcance de 140 m en zona cerradas y 3 km con línea de vista
- Potencia de transmisión 50 mW (+17 dBm)
- Velocidad de datos RF de 156.25 kbps
- Sensibilidad del receptor de -100 dBm
- Corriente de transmisión de 180 mA típica hasta 210 mA
- Corriente de recepción de 80 mA típica
- Corriente en modo Sleep 60 μ A típica
- Rango de temperatura de -40 °C a 85 °C (industrial)

Tabla 3.2: Descripción de pines del Xbee-PRO 900 DigiMesh

Pin	Nombre	Dirección	Descripción	Max Voltaje
1	Vcc	-	Tensión de alimentación	3.6 V
2	DOUT	Salida	UART Salida de datos	Vcc
3	DIN/CONFIG	Entrada	UART Entrada de datos	5 V
4	DIO12	Entrada/Salida	Entrada/Salida digital 12	Vcc
5	RESET	-	Modo reset	Vcc
6	PWM0-RSSI	Salida	Salida de PWM0 - Indicador de RX-	Vcc
	- DIO10		Entrada-Salida digital 10	
7	PWM1	Salida	Salida de PWM1 -Entrada/Salida digital 11	Vcc
	-DIO11			
8	[Reservado]	deshabilitada	No conectado	n/a
9	DTR - Sleep-RQ - DIO8	Entrada	Pin de control de línea de sleep - Entrada digital 8	5V
10	GND	-	Tierra	0 V
11	DIO4 - AD4	Entrada/Salida	Entrada/Salida digital 4 - Entrada análoga 4	Vcc
12	CTS - DIO7	Entrada/Salida	Control de flujo - Entrada/Salida digital 7	Vcc
13	ON - SLEEP	Salida	Indicador módulo de estado	Vcc
14	Vref	-	Referencia de voltaje para entradas análogas	Vcc
15	Associate-AD5- DIO5	Entrada/Salida	Indicador asociado- Entrada análoga 5 - Entrada/Salida digital 5	Vcc
16	RTS DIO6	Entrada-Salida	Solicitud de envío de control de Flujo - Entrada/Salida digital 6	5 V
17	AD3 - DIO3	Entrada/Salida	Entrada análoga 3 - Entrada/Salida digital 3	Vcc
18	AD2-DIO2	Entrada/Salida	Entrada análoga 2 - Entrada/Salida digital 2	Vcc
19	AD1-DIO1	Entrada/Salida	Entrada análoga 1 - Entrada/Salida digital 1	Vcc
20	ADO-DIO0	Entrada/Salida	Entrada análoga 0 - Entrada/Salida digital 0	Vcc

Este dispositivo consta de 20 pines ubicados en dos bloques laterales cada uno tiene una separación de 2 mm entre cada pin y una separación de 22 mm entre cada bloque, la footprint de este dispositivo no se encuentra dentro del ARES razón por la cual se realizó la construcción del dispositivo. Dentro de la PCB este está conectada la salida del regulador de 3.3 V, tierra, sensor de metano, sensor de dióxido de carbono, sensor auxiliar, nivel de batería y la UART del microcontrolador.

3.1.3. Sensor de gas metano TGS 2611

El TGS 2611 es fabricado por la empresa japonesa Figaro la cual se especializa en la detección de gases, este sensor posee una alta selectividad y sensibilidad a la presencia de concentraciones de gas metano, se caracteriza por su bajo consumo de energía de modo que se puede utilizar con tiempos de autonomía largos el consumo oscila entre los 56 mA, requiere una fuente de alimentación externa de 5 VDC, su estructura física lo hace indicado para aplicaciones de gases portátiles, está construido con electrodos de oro que sirven como terminales de contacto, su fabricación está basada en el óxido de estaño SnO_2 , está disponible en dos modelos diferentes, el TGS-C posee un pequeño tamaño mientras que el TGS 2611-E aumenta su tamaño debido a que posee un filtro para eliminar la influencia de gases de interferencia, lo que hace altamente selectivo para la detección de gas metano [29]. Ambos modelos satisfacen los requisitos de rendimiento de las normas UL1484 y EN50194, que son las normas de certificación de seguridad más utilizadas en Norteamérica y Europa respectivamente. Para más detalles de las normas visitar [30], [31].

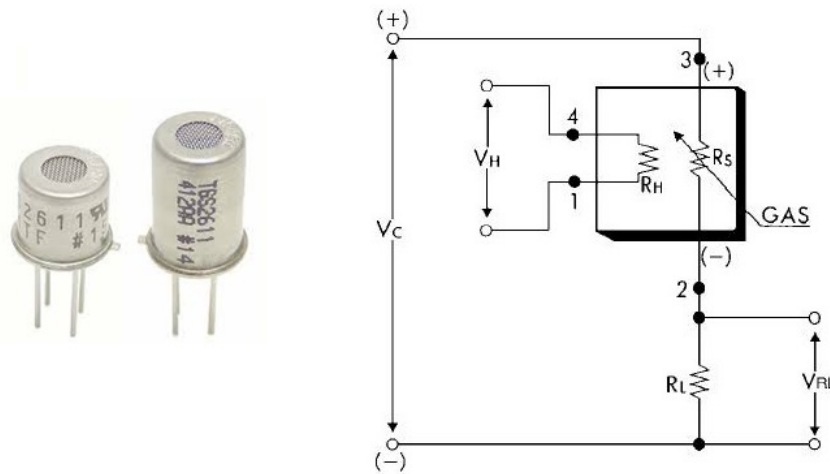


Figura 3.2: Sensor y esquemático de conexión del sensor TGS 2611

La figura 3.2 muestra el circuito de medición básico, la tensión del circuito V_c se le aplica a través del elemento sensor R_s , a través de un electrodo y la resistencia de carga R_L , la señal del sensor se mide sobre la resistencia de carga, la cual resulta una forma indirecta de medir del cambio de voltaje a través de R_L , de este punto se obtiene una señal análoga entre 0 V y 5 V la cual se puede conectar directamente a un conversor análogo a digital (ADC) para su posterior procesamiento, posee una resistencia de calentamiento R_H que se conecta al material RuO_2 el cual se encuentra impreso por el lado posterior del elemento sensor, encargada de mantener el elemento sensor a una temperatura específica que es óptima para la detección. Las características técnicas se muestran en la tabla 3.3.

Este dispositivo consta de 4 pines de conexión organizadas en forma de cuadro, cada uno de los pines tiene una separación de 3.6 mm, este sensor está conectado a la salida del regulador de 5 V, tierra y acondicionamiento de la señal, la footprint de este sensor no se encuentra en ARES por lo tanto se construyó. Adicional al sensor se realiza el acondicionamiento de la señal que entrega, para este acondicionamiento se deja un trimmer conectado entre los pines 1 y 2 con el fin de realizar las calibraciones periódicas del sensor.

Tabla 3.3: Características técnicas del sensor TGS 2611

Característica	Valor
Referencia	TGS 2611
Tipo de elemento sensado	D1
Encapsulado	TO-Metal
Gases detectados	Metano, Gas natural
Rango de detección	500-10.000ppm
Voltaje de calentamiento (VH)	$5.0 \pm 0,2 DC/AC$
Voltaje de circuito (VC)	$5.0 \pm 0,2 DC$
Resistencia de carga (RL)	$0.45 k\Omega min.$
Resistencia de calentamiento (RH)	59Ω
Corriente de calentamiento (IH)	$56 \pm 5 mA$
Potencia de calentamiento (PH)	$280 \pm 25 mW$

3.1.4. Sensor de dióxido de carbono CDM 4161

El sensor CDM 4161 (ver figura 3.3) es un módulo muy compacto, contiene un sensor de CO_2 TGS 4161 pre-calibrado el cumple con las normas UL1484 y EN50194. Tiene bajo consumo de energía, entregando una señal análoga que es capturada con microprocesador que actualiza los datos cada segundo y los compara con un valor de referencia que corresponde a la salida del sensor con aire fresco. Posee 5 pines de salida los cuales se describen en la tabla 3.4. El rango de detección va desde los 400 hasta 4000 ppm con una corriente de 100 mA máximo. Soporta rangos de temperatura entre -20 a 60 °C. Dentro de las consideraciones importantes que tiene el módulo están:



Figura 3.3: Sensor de dióxido de carbono CDM 4161

- Se debe tener cuidado al momento de aplicar la señal de pulso de referencia, ya que si esta no se realiza con los valores a aire fresco las lecturas posteriores estarán erróneas.
- El módulo está diseñado solo para interiores por lo tanto este debe estar protegido contra lluvia, viento y radiación solar

- Se debe seleccionar una tensión regulada para la alimentación del módulo, de lo contrario la lectura no es precisa.
- El circuito no incluye protección contra corriente excesiva, por lo tanto una corriente alta puede dañar el modulo.

Tabla 3.4: Características Tecnicas del sensor CDM 4161

Pin No	Nombre	Descripción
1	VIN	Voltaje de alimentación del módulo, corresponde a una señal DC de 3.5 V y 5.5 V, la salida del módulo es dependiente del nivel de potencial con el que se alimente.
2	VCON TRBL	Este pin tiene dos funciones dependiendo de la salida del sensor, se obtiene una señal análoga cuando se encuentra en rangos de operación entre 0.4 V y 4.0 V. Si la salida del sensor es anormal este pin se coloca en bajo.
3	CTRL	Cuando la concentración de CO2 excede 1000 ppm, este pin se coloca en alto para indicar un tipo de alarma.
4	RESET	Se utiliza para colocar la referencia al módulo con un señal en alto. El sensor toma una referencia de 400 ppm la cual corresponde a una señal para aire fresco. Despues de colocada la referencia el modulo inicia inmediatamente en operación.
5	TIERRA	A este pin se le conecta la referencia común del modulo.

La conexión de este sensor requiere un socket de 5 pines organizados en fila con una separación de 2.54 mm, la footprint que se le asocia es la del conector CONN-SIL5. Este sensor está conectado a la salida del regulador de 5 V, tierra, circuito de reset. Posee dos pines de salida conectados al Xbee y al microcontrolador, el circuito de pulso de referencia consta de un pulsador conectado de tal forma que cuando se active genere un pulso en alto que ingresa al pin 4 del sensor.

3.1.5. Sensor Auxiliar

Dentro del diseño de la PCB se deja un socket auxiliar conectado tanto al Xbee como al PIC. Esto se realiza debido a que dentro de la investigación realizada se determinó que además de la presencia de metano y dióxido de carbono existen otros gases que pueden llegar a ser perjudiciales para la los mineros. El socket auxiliar consta de 3 pines dos de alimentación y el otro para la salida del sensor la cual debe ser una señal análoga ente 0 V y 5 V.

3.1.6. Regulador LD1117

El LD1117 es un regulador de baja caída de tensión capaz de proporcionar hasta 800 mA de corriente de salida. Requiere un voltaje DC de entrada de 15 V, a una potencia de disipación de 12 W, se encuentra disponible en el mercado en versiones reguladas y versiones fijas de 1.2 V, 1.8 V, 2.5 V, 2.85 V, 3.0 V, 3.3 V y 5 V. Una de las características de mayor importancia en estos reguladores es el gran número de versiones de encapsulados, tales como el SOT-223, DPAK, SOP-8, TO-263, TO-252 y TO-220. Requiere un condensador de 10 μ F con el fin de obtener mayor estabilidad en la regulación, posee un rango de temperatura de operación de -40 °C a 125 °C ideal para trabajar en temperaturas cercanas a los 25 °C con una tolerancia de salida de 1 %, además es compatible pin a pin con los reguladores tradicionales como el 7805 o el LM317.

Con el fin de dejar el sistema presto a cambio de baterías con más autonomía, se implementa una serie de reguladores, el primero es un regulador de 5 V con una señal de entrada de hasta 15 VDC. A la salida de este regulador se conecta un regulador de 3.3 V para la alimentación del módulo Xbee. A la entrada y

salida del bloque de reguladores se conectan capacitores encargados de eliminar las fluctuaciones de la señal de voltaje. El empaquetado que se escoge para estos reguladores es el SOT 223-3 de montaje superficial, el cual costa de 3 pines de conexión con una separación de 2.31 mm y además cuenta con conexión del pin 2 con el chasis con una separación de 6.3 mm.

3.1.7. Baterías YSD 998

Cada uno de los módulos cuenta con regulador de 5 V y 3.3 V para alimentar el circuito, soportando hasta 15 V de alimentación en la entrada. De acuerdo con lo anterior la batería que se selecciono es la YSD 998, esta es un batería recargable de Li-Ion, que esta diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica empleando como electrolito una sal de Litio que provee los iones necesarios para la reacción electroquímica. Las ventajas de este tipo de baterías son: Elevada densidad de energía, poco peso, alto voltaje por célula, carecen de efecto de memoria, descarga lineal y una muy baja tasa de auto descarga. La batería cuenta con salidas de 12 V a 6500 mA/h, 9 V a 8500 mA/h y 5 V a 15000 mA/h. Dispone de un interruptor de encendido-apagado con visualización de funcionamiento mediante un indicador led bicolor. Pesa 300 gr, e incorpora su cargador para conectar a 120 V o 220 V con salida de 12.6 VDC, cuenta con 1 cable USB para salida de 5 V, 1 cable con conector jack de 5.5 mm para salida de 9 V y un cable con conector jack de 3.5 mm para salida de 9 V. El esquema de la batería se ilustra en la figura 3.4

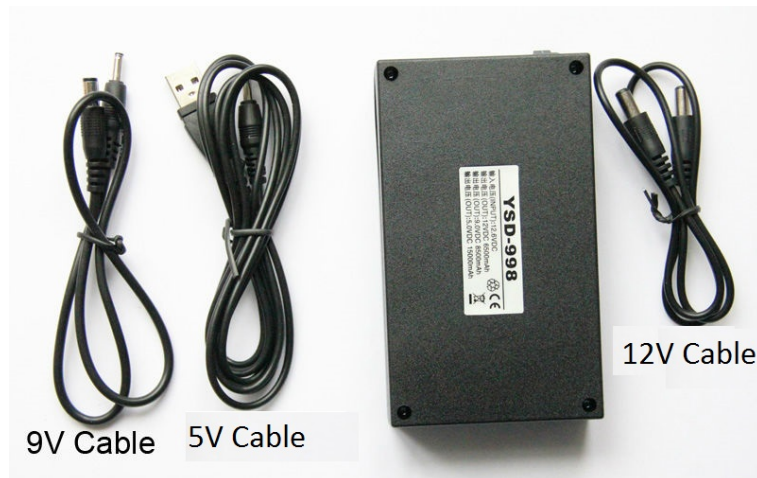


Figura 3.4: Bateria YSD 998 con accesorios

3.1.8. Salida AC del módulo

Dentro de la autonomía con la que cuenta cada módulo, está la salida AC la cual es habilitada por el microcontrolador, dependiendo de la ubicación del módulo puede activar elementos conectados a la red eléctrica, como bombillas motores etc. Este sistema consta de una configuración Moc-Triac la cual es útil para aislar el sistema de control con el de potencia, el optoacoplador elegido es el Moc 3021 el cual consta de 6 pines organizados en dos bloques de tres. La separación entre los pines es de 2.54 mm y entre cada bloque es de 7.62 mm. El empaquetado que se elige para este dispositivo es el DIL06. El triac seleccionado es el Q4015L5 este costa de 3 pines de conexión con una separación de 2.54 mm entre pines. La versión seleccionada fue el T0220 debido a que este encapsulado resulto el más apropiado para la aplicación . Para su conexión con las diversas aplicaciones se instaló una bornera de conexión de dos posiciones con una separación de 2.54 mm.

3.1.9. Salidas DC del módulo

Los sistemas de alarma con que cuenta el modulo constan de dos salidas DC de 12 V habilitadas independientemente por el microcontrolador. Una de las salidas es asignada a una cinta de leds, que se activa cuando el nivel de algún gas supera el umbral permitido. La otra asignada a una sirena DC para informar sobre alerta de evacuación inminente de la mina. El sistema está compuesto por una configuración de optoacoplador-transistor de potencia, para los cuales se seleccionaron el optoacoplador 4N25 el cual consta de 6 pines organizadas de igual forma que al MOC 3021. El transistor seleccionado fue el TIP 122, este es un transistor Darlington NPN de 3 pines con empaquetado TO220.

3.1.10. Diseño de tarjetas modulares

El diseño e implementación de circuitos está acompañado por una etapa de simulación y verificación, permitiendo la comprensión de su funcionamiento y detección de fallas dentro del mismo, una de las herramientas útiles con las que se cuenta es Proteus VSM de Labcenter Electronics que es un entorno diseñado para la realización completa de proyectos y construcción de equipos electrónicos en todas sus etapas. Dentro de las actividades que se pueden realizar están diseño, simulación, depuración y construcción. Cuenta con una gran cantidad de herramientas y componentes virtuales destinadas a generar todo tipo de señal para utilizarlas en los circuitos. Además cuenta con un gran grupo de instrumentos de medición los cuales resultan útiles para analizar las señales que generan los circuitos. Este software se basa en dos motores de simulación uno analógico ProSPICE y uno digital DSIM. Estos dos motores de simulación están totalmente integrados en tres potentes subentornos como son el ISIS para el diseño gráfico, VSM (*Sistema virtual modelado*) para la simulación y el ARES para el diseño de placas.



Figura 3.5: Diseño de PCB en proteus

Inicialmente se realiza el diseño gráfico del circuito electrónico. Para realizar este procedimiento Proteus cuenta con más de 34.000 componentes y partes, entre dispositivos genéricos, animados, interruptores, herramientas de simulación, microcontroladores, baterías y fuentes de alimentación. Además cuenta con la

posibilidad de crear nuevos componentes y la elección de estos dispositivos depende del circuito que se quiere implementar.

El desarrollo de la PCB se realizó siguiendo los pasos que se muestran en la figura 3.5. Inicialmente se realiza el diseño del circuito electrónico en el entorno ISIS, en esta parte se implementan todas las conexiones de todos los dispositivos que integran la PCB y se especifica cada uno de los componentes electrónicos a utilizar. Luego de definir los componentes electrónicos se realiza el Software del sistema, para este caso se elabora el código de programación para el PIC 16F877a con el fin de interactuar con las señales provenientes de los sensores y la batería. Con el diseño del hardware y el software de la placa se llevan a cabo las respectivas pruebas del sistema, tantas veces sea necesario de tal modo que el sistema se comporte manera deseada. El siguiente paso es el diseño del circuito impreso este se elabora en Ares buscando que todos los componentes especificados en el diseño del circuito electrónico posean footprint. En caso que no ‘posea Footprint se diseña para asociarlo con el esquemáticos de ISIS-Proteus, el vínculo entre los entornos lo realiza Proteus facilitando el desarrollo de la PCB ya que cualquier cambio que se genere en el ISIS repercute en el diseño en ARES, inicialmente el diseño de la PCB comienza ubicando los dispositivos de tal manera que cuando se implementen se acoplen adecuadamente evitando generar cortocircuitos. El resultado del diseño se muestra en la figura 3.6, allí se observa que están construidas a doble capa, en la capa superior están alojados todos los componentes electrónicos del diseño mientras que en la capa inferior se tienen pistas de conexión entre los componentes. la tarjeta tiene la capacidad de conexión cualquier sensor que suministre una salida analógica en un rango de 0 V a 5 V, luego de tener el diseño finalizado se exportan los gerbers para su construcción física que se muestra en la figura 4.2.

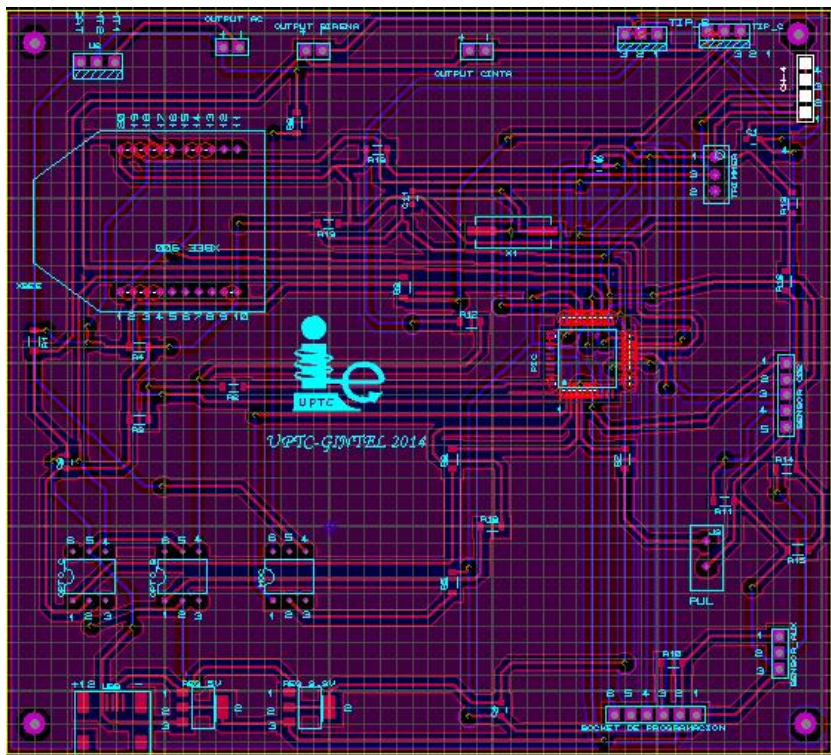


Figura 3.6: Diseño de la tarjeta para modulo de sensado inalámbrico de gases en minería

3.2. Optimización del consumo de energía y configuraciones eficientes

La optimización del consumo de energía por parte de los módulos está garantizada con la configuración que se realiza en la red a cada uno de los dispositivos Xbee-pro DigiMesh. Dentro de las configuraciones se propone habilitar la red con una topología en árbol que permita a un dispositivo coordinador tener el control de la red para evitar el envío de datos cuando no es necesario. Se configuran los dispositivos en modo API con el fin de que la información proveniente de los sensores y batería se empaqueten en una sola trama para disminuir el número de envíos de paquetes de RF y aumente la velocidad en la decodificación de los datos. Con el fin de que la información se envíe en una sola trama es necesario que todas las señales sean procesada por el Xbee, para lo cual se habilitan los canales ADC con tiempos de muestreo de un segundo. El aporte más significativo en el consumo de energía se propone con la configuración de la red en modo sleep que permite al coordinador mantener ciclos de sueño y vigila sincronizados de tal manera que cuando se esté enviando información de parte de los módulos se tenga la certeza de su procesamiento de lo contrario los módulos entran en una inactividad total reduciendo sustancialmente el consumo de energía.

Para acceder a la configuración o cambiar el firmware de un Xbee se debe hacer desde el programa X-CTU. Esta es una aplicación con entorno Windows proporcionada por Digi con capacidad para interactuar con el firmware del dispositivo. EL X-CTU posee una interfaz amigable con el usuario, está diseñada para funcionar en todos los equipos basados en Windows 98 o superior, la conexión se realiza con un ordenador por medio de un puerto USB utilizando una base de programación de Xbee. Se ejecuta la aplicación permitiendo inicialmente realizar un test de comunicación con el módulo Xbee, y luego se lee la configuración del dispositivo. Al realizar este procedimiento se muestran todos los atributos presentes y se realizan todas las configuraciones necesarias. Finalmente se configuran y escriben los parámetros al dispositivo.

3.2.1. Configuración de la red

Estudiada las topologías y el papel que puede cumplir los módulos Xbee dentro de una red y analizando la estructura de una explotación minera se determinó que la configuración más adecuada para la detección de gases en minería es una topología tipo árbol. Esta configuración permite retransmitir los datos de los módulos más alejados. Además esta configuración permite organizar los módulos de tal manera que la transmisión de los datos cubra las galerías y se interconecten los nodos para enviar los datos a la bocamina. La topología consta de módulos distribuidos en toda la mina, configurados como routers, con el fin de establecer un sistema seguro para la transmisión de los datos. Esta configuración permite que los módulos realicen un escaneo inicial para determinar la ruta de envío de los datos. Sin embargo si un módulo falla el sistema está en la capacidad de establecer una nueva ruta con los módulos disponibles al que se encuentren alcance de la transmisión. Al final de los routers existe un dispositivo configurado como coordinador, el cual es el encargado recibir los datos de toda la red, y enlazarlos con la tarjeta de desarrollo BeagleBone. Esta tarjeta hace la interfaz de los datos con una plataforma web donde se visualizan los niveles de gases en cada uno de los módulos, la representación gráfica de la red se muestra en la figura 3.7.

3.2.2. Configuración modo API

Uno de los inconvenientes que se tiene al momento de realizar una red de sensores es la identificación de los datos en el coordinador ya que este recibe los datos de todos los sensores sin tener en cuenta la dirección de origen, debido a este problema se tiene que realizar la configuración de los xbee en modo API, este modo es el más complejo en transmisión de datos, ya que la información se envía por medio de frames con cabeceras que aseguran la transmisión de los datos, cada frame está compuesto por un indicador de trama, longitud de la trama, dirección de origen, datos, y un Checksum que indica que el paquete se recibió con éxito, los módulos Xbee-pro DigiMesh 900 RF soportan tres modos API, la configuración se realiza colocando un valor en el registro AP, con AP=0 (Por defecto), en este modo se envía solo el dato sin ningún tipo de información adicional, con AP=1, la información se empaqueta en frames, con AP=2 la información

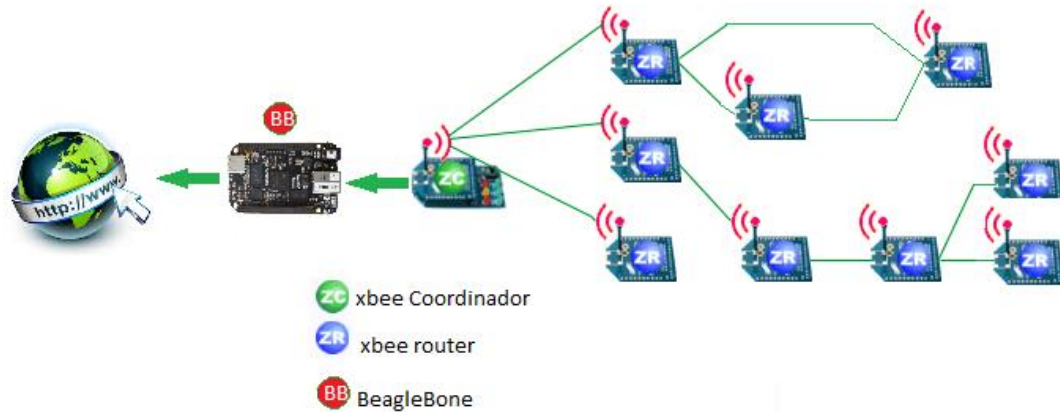


Figura 3.7: Configuración de la red

se empaqueta en frames y además se pueden especificar caracteres de escape, este modo se usa para evitar conflictos con ciertos bytes que puede causar confusión por la UART al decodificador. La habilitación del modo API permite que la trama mantenga siempre la misma estructura, por lo tanto la decodificación de los datos se realiza de acuerdo con esta estructura y aquellos datos que no cumplen con estas condiciones son desechados la configuración que se escoge para el proyecto es AT=1.

3.2.3. Configuración canales analógicos

Como se muestra en la tabla 3.2 el Xbee-pro DigiMesh 900 RF cuenta con 6 canales ADC configurables por software. Para este proyecto se habilitan 4 canales, desde el pin 17 al 20 con el fin de recibir señales provenientes del sensor de metano (TGS 2611-E), sensor de dióxido de carbono (CDM 4161A), nivel de batería, y un sensor auxiliar. La habilitación de estos canales se realiza colocando los pines en modo 2, los módulos están en la capacidad de realizar un muestreo constante de los canales que se habilitaron, este tiempo de muestreo se carga en el registro IR, el mínimo valor permitido es de 1 ms para una frecuencia de muestreo de 1 KHz. El periodo de muestreo está determinado por la prioridad del proceso que se esté manejando para este caso se toman muestras cada segundo por lo tanto el valor cargado en el registro IR es de 1000. Este periodo de muestreo se determina bajo la consideración de enviar suficientes muestras mientras el modulo este en actividad, con el fin de refrescar los todos los datos de la interfaz del servicio web.

3.2.4. Modo sleep

En la configuración propuesta para la red de sensores se determina un coordinador encargado de recibir los datos de los routers los cuales se encuentran distribuidos en los socavones de la mina, bajo esta premisa se configura que la actividad de los módulos este sincronizada por el coordinador, de esta manera la configuración de la inactividad de los módulos estará coordinada por paquetes de sincronización que envía el coordinador hacia los routers, cada uno de estos recibe estos paquetes y los mantiene durante el funcionamiento de la red, el envío de datos estará determinada por el registro SP mientras que el sueño está determinado por el registro ST. La configuración consiste en:

- Establecer el coordinador de la red con SM
- Configurar modo de sueño sincronizado para el coordinador
- Configurar tiempos de sueño y vigila al coordinador mediante el SP y ST respectivamente
- Configuración de sueño sincronizados a los routers

- Encender coordinador luego módulos y esperar que se sincronice la red

3.3. Diseño del servicio web

De acuerdo a las especificaciones del proyecto monitoreo inalámbrico de gases en minería se estableció que se debería crear un servidor web en el cual se lograra observar en tiempo real el comportamiento de algunos gases dentro de una mina subterránea al igual que el nivel de carga de las baterías de cada módulo. Además que cumpliera con las siguientes características: la elaboración en software libre, implementado en una plataforma de bajo costo, de tecnología multiplataforma, y que fuera accesible desde la internet.

Para la realización de la página web se utilizó Python en su versión 2.7.3 esta es una de las últimas versiones más estables de este software, a su vez para la agilización del desarrollo de la página web se utilizó el framework Django en su versión 1.6.3, y para la maquetación del diseño de la página web se utilizó HTML junto con complementos como JavaScript, y librerías css.

3.3.1. Porque Python

La linux jornal es una de la revistas más importantes de software libre a nivel mundial, y centra su contenido en aplicaciones que están bajo desarrollo de distribución gratuita, es por esto que en sus distintas ediciones se pueden encontrar un sin número de programas, aplicaciones entre otros, los cuales son una gran fuente de información para todo aquel que desee crear aplicaciones de software libre. Una de sus ediciones más esperadas son los Readers'Choice Awards, en la cual se presentan las mejores aplicaciones dentro de un rango específico, dentro de las cuales esta el mejor lenguaje de programación y el mejor script de programación. Python ha sido el ganador de estas dos categorías por 3 años consecutivos, siendo el año 2013 su último galardón (ver figura 3.8), en la cual se destacó además como el mejor lenguaje de principiantes, donde destacan su sintaxis limpia y contenido legible.

Python es un lenguaje de programación de propósito general, que está desarrollado para realizar cualquier tipo de aplicación sin necesidad de tener conceptos avanzados de programación. Dentro de sus principales características están: multiplataforma, sintaxis limpia, librerías para las distintas aplicaciones y de naturaleza open source. Vease por ejemplo [32]

Python es un lenguaje multiplataforma, ya que tiene soporte para los diferentes sistemas operativos presentes en el mercado, que van desde Linux (precargado en sus diferentes versiones) pasando por las plataformas Windows (Windows Cp, Windows 7, Windows 8), Macintosh y por ultimo llegando a plataformas poco conocidas como lo son: Solaris, OS/2, OS/390, AROS, AS/400, BeOS, z/OS, OS, VMS, Psion, Acorn RISC OS, VxWorks, Sharp Zaurus, Windows CE, Palm y PocketPC, para todas estas existe una versión gratuita que se puede descargar directamente desde página oficial de Python. Otra de las ventajas importantes de este lenguaje es la sintaxis que se maneja, ya que por medio de la indentación se establecen los bloques imperativos dentro del programa, es decir todo aquello que pertenezca a un bloque debe estar una tabulación más hacia la derecha del bloque principal.

Dentro de las múltiples ventajas de Python existe una que puede llegar a ser decisora a la hora de realizar una aplicación determinada, esta es que este lenguaje ofrece una gran cantidad de librerías para cientos de propósitos, dentro de estas están: comandos básicos de programación, visualización de datos, interfaces con hardware, estándares de comunicación, manejo de herramientas web entre otros. Para este proyecto se utilizan las librerías de operaciones matemáticas, librería de visualización de datos, librerías principales entre otras, todas estas características lo hacen muy llamativo, Sin embargo es recomendable revisar y entender las condiciones de comercialización de un software antes de utilizarlo y comercializarlo dado que se puede incurrir en la violación de los derechos de autor contenidos en el código penal colombiano título VIII.

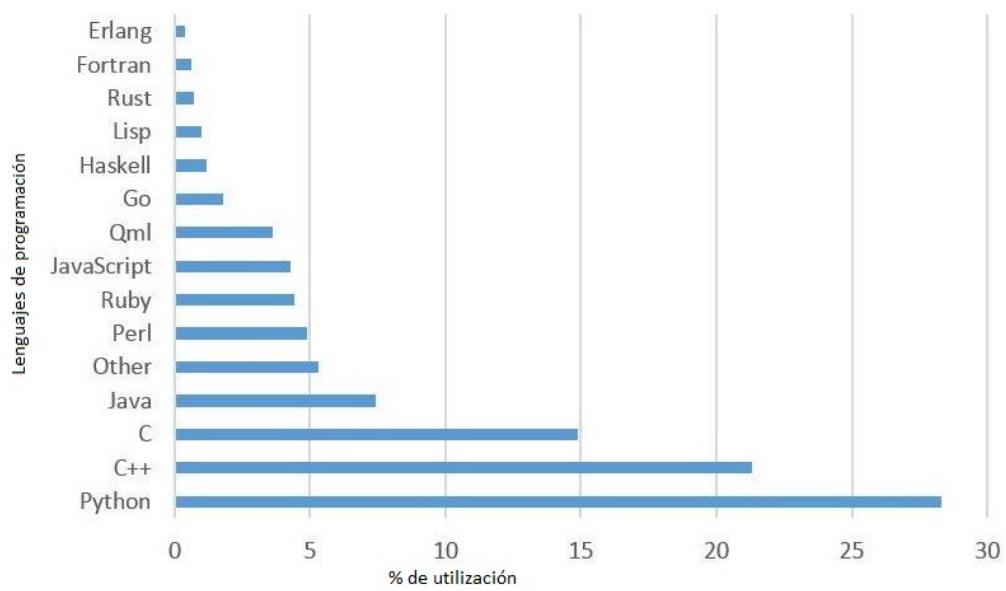


Figura 3.8: Grafico comparativo entre lenguajes de programación

Para el caso del lenguaje Python, se distribuye bajo la licencia de código abierto llamada Python software foundation license (PSFLA), en la cual se abordan los principales ítems de comercialización de un producto realizado en Python.

Licencia de comercialización de Python

libre distribución: La PSFLA concede al “licenciatarario ”explícitamente los derechos de reproducir, analizar, probar, mostrar, modificar o incluir en otros desarrollos, distribuir y por supuesto usar, Python de manera mundial y libre de royalties.

La PSFLA cumple por lo tanto con este punto, referente a la distribución libre del software, puesto que permite dar o vender el programa, sin requerir ningún pago.

Como única condición puesta a la redistribución de Python está el requerimiento de incluir una copia de la PSFLA y el aviso de copyright del software.

Código fuente: La PSFLA no hace ninguna restricción a la forma en que Python o cualquier trabajo derivado puede distribuirse. Como Python es distribuido por la PSF tanto en versiones fuente como binarias, podemos considerar que se proporciona el fuente del programa.

No habiendo ninguna restricción al respecto, la PSFLA cumple con el requisito 2, puesto que permite la redistribución de este código fuente.

Trabajos derivados: El mismo punto 2 de la PSFLA concede explícitamente el derecho a modificar el software o a derivar otros programas de él. La misma ausencia de restricciones del apartado anterior permite que los trabajos derivados se distribuyan bajo la PSFLA, en las mismas condiciones.

Adicionalmente a las condiciones de redistribución de Python (La copia de la licencia y el aviso de copyright), cualquier trabajo derivado de Python debe incluir un breve resumen de los cambios realizados a Python para su empleo en dicho trabajo.

Integridad del código fuente del autor: Este apartado de la definición de Software Libre permite (opcionalmente) al autor del software prohibir la distribución de versiones modificadas de su código fuente original, siempre y cuando permita la distribución de las modificaciones como “parches ”conjuntamente con el código fuente.

A pesar de la gran cantidad de librerías que ofrece Python, existen algunas falencias con los servidores web, debido a esto se han ido desarrollando aplicaciones que se interrelacionan directamente con Python, dentro de estas aplicaciones están los frameworks, que son básicamente un conjunto de librerías para un propósito muy específico. Dentro de los frameworks que manejan directamente los servicios web estan Django, Grok, Pylons, TurboGears, web2py, zope2. Cada uno de estos tienen aspectos a favor y en contra sin embargo existe algunos que facilitan el desarrollo web, uno de ellos es Django un framework que sus creadores han denominado el framework para los desarrolladores con límite de tiempo.

3.3.2. Porque Django

En una de las conferencias del creador de Python Guido Van Rossum, mencionó que su framework preferido para el desarrollo web, era algo llamado Django ”My personal favorite – and I expect that that will remain a personal favorite for a long time – is something named Django. ... I highly recommend it.”

Django es un framework de desarrollo web hecho en Python que facilita y agiliza el desarrollo de páginas web dinámicas, dentro de sus principales características están: interfaz de administrador automático, diseño de urls, manejo el concepto de modelo vista controlador y manejo fácil con bases de datos.

Django se puede descargar directamente desde su página web, por ser un complemento de Python también cumple con las funcionalidades de ser código libre. Después de tener la instalación es muy fácil crear el primer proyecto basta con una línea de código en la consola “`django admin.py startproject página web`” la cual crea una serie de carpetas en donde está la página web, solo basta con ejecutar la siguiente línea de código “`Python manage.py runserver`” que hace que el servidor se ejecute en localhost de la máquina, en el archivo `manage.py` están las configuraciones que trae Django por defecto como lo es el template de inicio, la urls, las vistas etc. Además de esto ya está habilitada la interfaz de administrador (Ver figura 3.9), una página web intuitiva en donde aparecen los principales campos que afectan directamente el funcionamiento de la página web creada, esta página es creada automáticamente por Django y su principal funcionalidad es crear una web donde se pueda hacer mantenimiento a la página creada de una forma fácil, simple y sobre todo amigable con el programador.

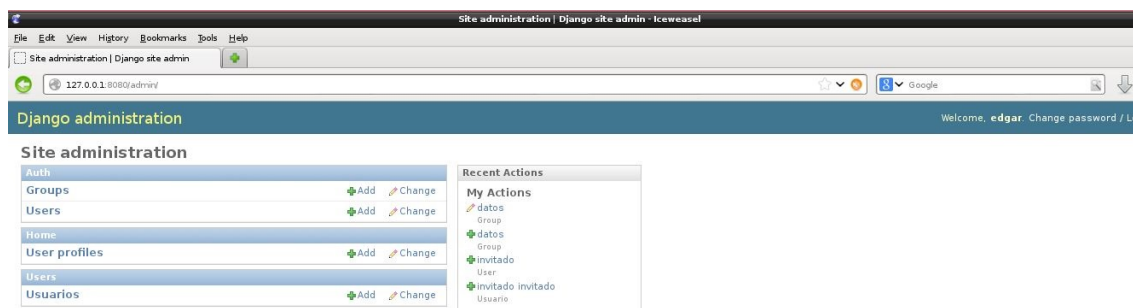


Figura 3.9: Administrador de Django

3.3.3. Manejo de URLS

Una gran ventaja que ofrece Django es el manejo de urls de forma elegante, ya que permite la creación de urls sin ninguna restricción y sin necesidad de que contengan textos referentes al sistema de programación, la urls se configuran básicamente en un archivo principal llamado “`url conf.`”, en el cual se especifica la vista a la que corresponde dicha url, además de ello se pueden crear archivos dedicados en donde solo se especifiquen las urls de una aplicación en particular con ello se tendrá la ventaja de tener archivos por cada una de las aplicaciones lo cual hace más fácil la identificación de errores de tipo maquetación de direcciones.

Modelo, vista y controlador

Uno de los retos más grandes de hacer aplicaciones web es la interacción de los tres aspectos fundamentales como lo son la vista, el modelo y el controlador. La vista es el encargado de mostrar los datos, el modelo es el que manipula los datos y por último el controlador es el encargado de hacer la conexión entre la vista y el modelo. Django maneja fielmente este principio, porque maneja estos tres aspectos de manera independiente ya que separa estos aspectos en archivos individuales, para la vista se elabora un archivo en lenguaje HTML (Hyper Text Markup Language). El cuál es el encargado recibir y mostrar los datos al público, para el modelo Django crea una archivo llamada `views.py` en el cual se procesan los datos, cada vista responde a una solo template y este es el encargado de recibir y mostrar los datos en la página web, para enviar estos datos es necesario abordar algo llamado “diccionarios Django”, que es lo que se quiere observar en la página, estos

se envían como un contexto y solo el template asociado los llega a interpretar. Este tipo de programación se hizo notoria cuando se realizaban aplicaciones, ya que por naturaleza el código contendrá errores, que la maquina no depurara, lo cual hace que se tenga que corregirlos, pero era allí donde se acrecentaban los mayores problemas ya que la solución de estos era muy demorada todo gracias a la complejidad del código, al tener en un mismo archivo la parte de visualización y procesamiento de los datos referentes a la aplicación.

3.3.4. HTML

El HTML es el lenguaje que se utiliza en la creación de páginas web, en el cual están establecidos los protocolos de la estructura de una página web. Este lenguaje es muy utilizado ya que es el que maquetaba las páginas web, además de esto tiene una gran cantidad de conexiones con otros lenguajes de programación, con lo que permitiese crear contenidos más dinámicos y de mayor impacto visual. Python en su framework Django también tiene una conexión directa con HTML, es decir existen una serie de etiquetas para el lenguaje HTML que son propias de Django, pese a todas las potencialidades de HTML, han ido surgiendo versiones de este mismo, todo esto para realizar mejoras a la maquetación de la página web, a través de sus diferentes versiones se han ido integrando hacia la interrelación directa con contenido multimedia, para esto se han ido desarrollándose librerías que contienen estilos, colores márgenes de las estructuras que se utilizan, una de estas tecnologías es twitter bootstrap que es un framework que se encarga de crear sitios de diseños responsivos es decir, sitios que se adapten a los dispositivos donde se visualiza, para realizar esta integración utiliza contenidos Css, JavaScript, los cuales además de crear sitios responsivos dar una forma más agradable a los principales componentes de las páginas web.

3.4. Plataforma de desarrollo

En la elección de la plataforma de desarrollo se tuvieron en cuenta aspectos como: integración con el lenguaje de programación Python, bajo consumo de energía, conexión directa a internet, módulos de comunicación seriales, fácil acceso en el mercado, bajo costo, para esto se realizaron una serie de elecciones de plataformas presentes en el mercado entre las cuales están raspberry pi, cubieboard, Beaglebone, todas ellas ofrecen un sin número de potencialidades a nivel de software, la cubieboard fue descartada por su alto costo y difícil adquisición en el mercado, por ultimo quedaron las dos plataformas las cuales cumplen a cabalidad todos los requerimientos del proyecto, se decidió por la Beaglebone black por ser más conocida en el ambiente estudiantil y por sus mejoras en la nueva versión, además que es muy económica frente a su rival directo la raspberry pi .

3.4.1. Beaglebone black

La Beaglebone black es una tarjeta de desarrollo de bajo costo con un alto rendimiento, basado en el procesador un XAM3359AZCZ100 Cortex A8 ARM de Texas Instruments, soporta una gran cantidad de sistemas operativos entre los cuales están las ultimas distribuciones de Linux: debían, fedora, Ubuntu arclinux, gentoo ; y otros como Android, todos ellos con la particularidad de que son de distribución gratuita, debido a esta característica es que son compatibles con un sin número de lenguajes de programación, dentro de estas están Python, c++, c, node.js, java y Ruby entre otros. A continuación se establecen las principales características de hardware de la Beaglebone black.

3.4.2. Implementación del servidor web

La plataforma de desarrollo Beaglebone viene de fábrica con un sistema operativo muy limitado que no permite acceder a ciertos módulos, para ello se hace necesario instalar un sistema operativo compatible con

Tabla 3.5: Características Beaglebone black

Nombre	Características
Procesador	1Gz Sitara AM3359AZCZ100
Motor Grafico	SGX530 3D, 20M Polygons/S
Memoria Sdram	512 MB DDR3L 400MHz
Flash	2GB,8bit Embedded MMC
Pmic	TPS65217C PMIC regulator and one additional LDO.
Alimentacion	miniUSB
PCB	3.4 in x 2.1 in, 6 capas
Indicadores	1 Poder, 2 Ethernet, 4 Leds para control del usuario
Puerto serial	UART0 via pin 6 3.3V TTL.
Ethernet	10/100, RJ45
Sd/conector mmc	microSD, 3.3V
Entradas de usuario	Botón Reset, Boton power
Salida de video	16b HDMI, 1280x1024Max 1024x768,1280x720, 1440x900w, Soporte EDID
Audio	Via HDMI, Stereo
Conector de expansion	Poder 5V, 3.3V $VDD_{ADC1,8V3,3VI} - OM_{cASP0, SPI1}$
	I2C, GPIO 69, LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN(1.8 MAX),4
	Timers, 4 Puertos Seriales, CAN0, EHRPWM (0.2)
Consumo	Interrupciones XDMA, Botón de Poder
Peso	210-460mA @ 5V Dependiendo de la actividad y velocidad del procesador
	39.68 gramos

la Beaglebone, en la cual tengamos acceso a sus potencialidades, para ello se escogió un sistema operativo Linux (debían) con una versión de kernel 3.8.13 que es compatible con los adaptadores USB WIFI, el sistema operativo se puede descargar directamente desde la página principal de beagleboard. En este sistema operativo viene precargado el lenguaje Python en su versión 2.7.3, lo que falta es descargar los archivos necesarios de Django para lograr correr la aplicación desde la plataforma. Además de dar soporte a la página web, la plataforma debe estar en comunicación con un Xbee el cual proporcionara la información de las tramas, esta comunicación se realizó mediante el protocolo RS 232, disponible en las dos tecnologías, Beaglebone y Xbee pro DigiMesh.

Dentro de las múltiples potencialidades de la plataforma de desarrollo esta tiene una serie de módulo de comunicación serial, para el manejo de estos módulos es necesario contar con librerías que se encarguen de establecer protocolos con el procesador, para ello se utilizó una librerías de distribución gratuita ofrecidas por la compañía Adafruit Industries, esta es una página de desarrollo de software en la cual existen un sin número de colaboradores que sin ningún interés ofrecen los distintos paquetes-librerías, una de ellas es Adafruit-BBIO.UART, que es la utilizada para manejar eficientemente los módulos de comunicación serial, esta librería puede ser descargada libremente de la página principal de industries adafruit.

Después de realizar todas las actualizaciones pertinentes del software, se hace necesario montar la aplicación de servidor web para esto se desarrolló un servidor http web que se muestra en la figura 3.11, el cual es un servicio que permite acceder desde la internet a un contenido específico, ya sean archivos de una computadora o páginas web estáticas, actualmente es muy utilizado ya que es usado en un 70 % de las paginas existentes en la internet, este software es distribuido por la compañía Apache software fundation, y es de distribución gratuita, ya que cumple con los requerimientos de modificar, usar y distribuir versiones modificadas, lo que continua con los requerimientos del desarrollo del proyecto.

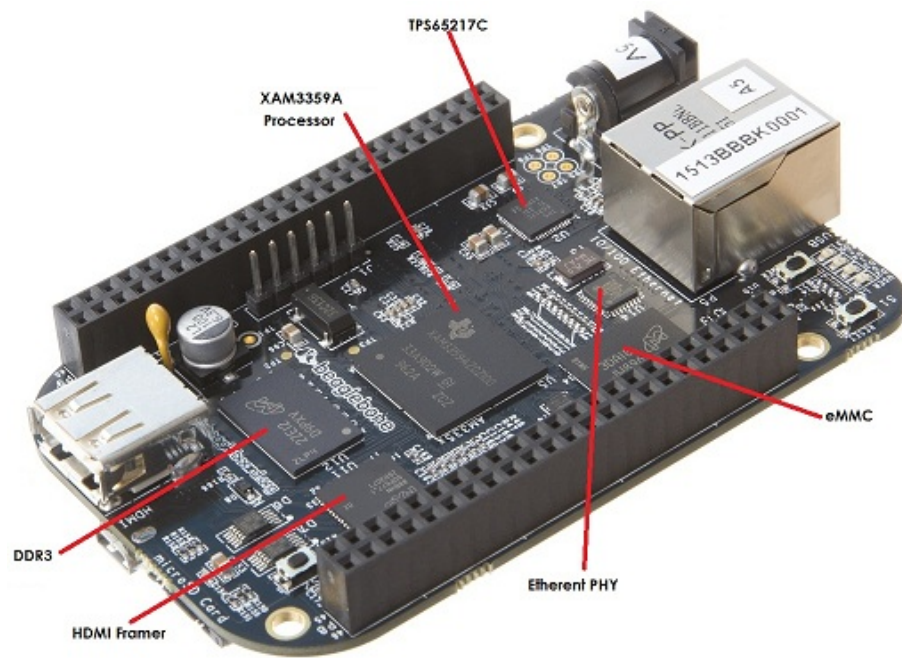


Figura 3.10: Principales componenetes de la tarjeta de desarrollo Beaglebone

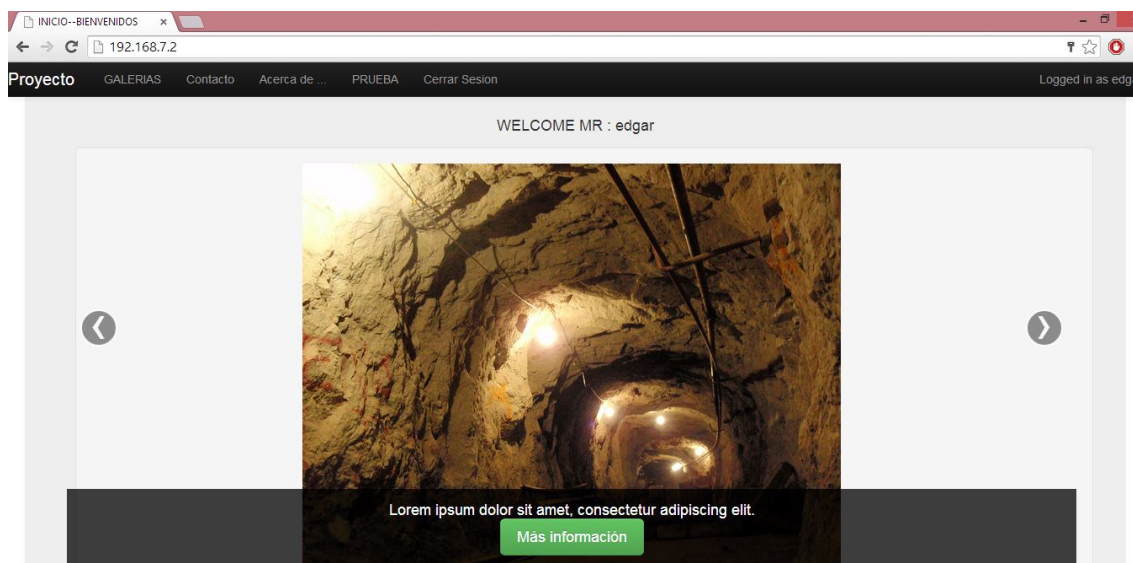


Figura 3.11: Interfaz web para el sensado de gases en minería

3.4.3. Servidor apache

Al implementar el servidor http web con apache es necesario asignarle un puerto a la Beaglebone, para que cuando sea accedido desde internet la plataforma redirija esta petición y muestre todo lo que se esté enviando a ese puerto, para esto es necesario realizar una NAT (network address translation).

Una dirección IP publica es una etiqueta que identifica un dispositivo dentro de una red, existen direcciones IP públicas y direcciones IP privadas, las direcciones IP privadas son aquellas que son propias de cada computador, ya que solo se puede acceder a ella si esta conectada a la LAN, las direcciones IP privadas son aquellas con las cuales se puede acceder a la internet WAN y dependiendo del tipo de conexión son asignadas por el proveedor de servicios de internet. Para el caso del servidor http web, se monta sobre una dirección IP privada, ya que inicialmente solo se puede acceder a ella si se está conectado a la red LAN, debido a este inconveniente se debe realizar una NAT, la cual permite redireccionar el destino hacia donde se envía la petición, supóngase que el router que provee internet a la aplicación esta con la dirección IP publica 190.252.146.123, y la aplicación se está ejecutando en el puerto 80, pero con dirección 192.168.1.100, lo que ocasionaría que estas redes nunca se comunicaran para esto se realiza una traducción de dirección de red la cual consiste en que toda aquella petición que se realice a la dirección 190.254.146.123 será redirigida al puerto 80 de router que estará el servidor http web, corresponderá a la dirección 192.168.1.100, esta redirección de redes se debe realizar en las configuraciones del router que provee los servicios de internet (Ver figura 3.12).

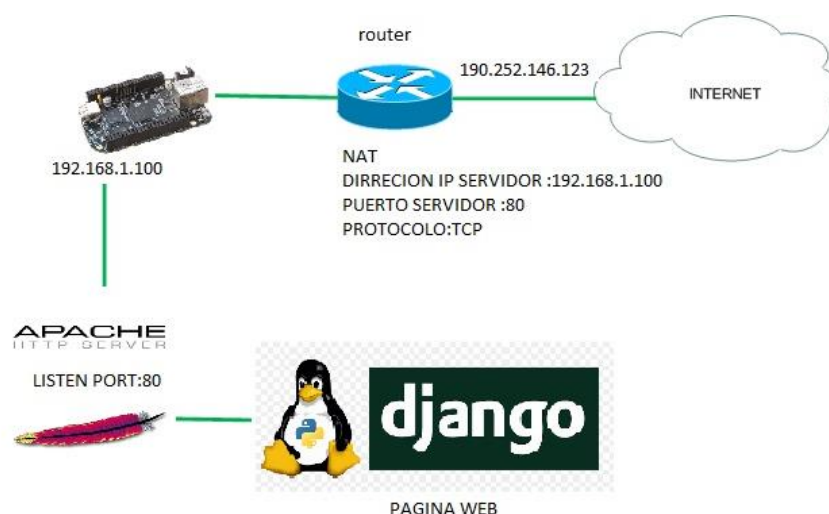


Figura 3.12: Traducción de direcciones de red para subir la página a internet

3.5. Identificación de datos

3.5.1. Comunicación serial

Los Xbee se comunican de manera inalámbrica mediante el envío de paquetes entre un dispositivo inicial router y un dispositivo final coordinador, estos paquetes pueden ser de dos tipos, el primero, envío de datos de manera secuencial, y el segundo un envío de tramas. Para el envío de paquetes es necesario que exista un dato en el buffer, este se encarga de enviarlo a todos los posibles destinatarios, este es considerado como el

modo más simple de envío de datos ya que solo es aplicable cuando en la red solo hay un receptor y un emisor de información, cuando se desea construir una red de transmisión de datos se hace necesario disponer de un sistema más complejo de comunicación para garantizar que sea optima, para esto la empresa desarrolladora de los módulos implemento una forma de comunicación por tramas en la cual cada uno de los módulos enviara una serie de datos propios de cada módulo. Debido a esto se tiene un mayor control en este tipo de comunicación, dentro de los beneficios con que cuentan los módulos de comunicación inalámbrica, están el procesamiento de adc, adquisiciones de datos digitales, que son señales de entrada, es decir el modulo los procesa y los encapsula dentro de la trama, por ejemplo si el modulo debe procesar 2 canales analógicos y una entrada digital, este realiza la conversión y el resultado es enviado como parte de una sola trama (ver tabla 3.6).

3.5.2. Identificación de la trama de cada módulo

Cada módulo Xbee trae de fábrica un número serial único e irrepetible el cual es conocido como el número Mac, este número es indispensable ya que me permite identificar que datos provienen de cada módulo. Los módulos Xbee tienen una particularidad que todo lo que reciben inalámbricamente lo envían inalámbrico, pero a la vez también lo envían mediante RS 232, esto es aprovechado ya que como se debe tener un módulo final de recepción datos este se aprovecha para poder extraer los datos y tomarlos via RS 232, los cuales van directamente conectados a los pines de la recepción y transmisión de la Beaglebone, esta recibe las tramas de cada uno de los módulos que se encuentran sensando al interior de la mina, en estas tramas debe venir las direcciones MAC de cada uno de los módulos, con lo que en la programación de la Beaglebone se hace la selección dependiendo de este número, teniendo este aspecto seleccionado se prosigue a seleccionar por modulo que dato corresponde a cada uno de los sensores instalados, allí es cuando se decidió que todos los datos que arrojaba los sensores fueran procesados por los canales analógicos de los Xbee, ya que este realiza la conversión y los empaqueta de tal forma que los coloca en la trama, con lo cual en cada trama de los Xbee se puede identificar fácilmente su dirección MAC y además cuales son los datos de cada uno de los sensores, con esta información se realiza el código y dependiendo de esta clasificación es que se pueden llegar a escribir los archivos planos de cada uno de los sensores, la descripción de la trama de los mosulos xbee se muestra en la tabla 3.6

Para la parte de visualización de los datos de monitoreo se ha establecido que los datos se representaran mediante barras de progreso (ver figura 4.3), las cuales se realizaran en las plantillas, las vistas enviaran los respectivos valores de dichas barras de progreso, al realizar el proceso de envío de datos se consulta al respectivo archivo de texto plano, cual ha sido el último dato escrito, este último dato es tomado junto con la hora de dicha muestra, y es enviado a la plantilla correspondiente allí por medio de unas etiquetas de HTML, reconoce que son datos propios de la vista, y los maqueta de una manera que cada vez que cambie el dato se verán los resultados en esta página web.

Uno de los aspectos más llamativos del proyecto es contar con una serie de graficas en los que se plasme el comportamiento de dichos gases en un tiempo determinado, para ello se realizó una toma de datos de manera periódica en la que se guarden los datos en archivos de texto plano, todos estos datos son tenidos en cuenta a la hora de graficar el historial, para el desarrollo del proyecto de realizaron un serie de historiales entre los cuales están el historial, semanal, mensual, y diario todo ellos para poder analizar los factores más importantes que ocasionan el aumento del nivel de gas en dicha zona. Para la visualización de los datos se utilizaron una serie de librerías de JavaScript integradas con HTML, las cuales permiten crear una serie de gráficos más animados, entre los que están gráficos de líneas barras tortas etc. Lo que facilita su interpretación. Cabe resaltar que las librerías utilizadas son Google Visualization API Reference, las cuales son de distribución gratuita y son realizadas por desarrolladores de la comunidad google developers.

Tabla 3.6: Descripción de trama de datos Xbee

Nombre	Valor Hexa	Descripción
Delimitador de trama	7E	Todas las tramas son api tiene el delimitador de trama
Longitud	18	Longitud de la trama
tipo de trama	92	Es generado automáticamente por las muestras de entrada salida
Identificador de trama	0	Este identificador de trama pertenece al comando AT remoto
Dirección fuente(Mac) alta	7D33A200	Parte alta de la dirección Mac del dispositivo
Dirección fuente(Mac) baja	40840142	Parte baja de la dirección Mac del dispositivo
Reservados	FFFE	Bytes reservados por el sistema
Opciones de recepción	02	Información adicional del ack de la trama
Cantidad de muestras	01	Cuántas muestras se enviarán en cada trama
Comando AT	000F	Indica que comando AT corresponde a la trama
Separador muestra 1	03	Bytes de separación muestra analógica 1
Muestra análoga #1	FF	Dato hexadecimal de canal análogo 0
Separador muestra 2	00	Bytes de separación muestra analógica 2
muestra análoga #2	00	Dato hexadecimal de canal análogo 1
Separador muestra 3	03	Dytes de separación muestra analógica 3
Muestra análoga #3	FF	Dato hexadecimal de canal análogo 2
Separador muestra 4	03	Bytes de separación muestra analógica 4
Muestra análoga #4	FF	Dato hexadecimal de canal análogo 3
Cheksum	9C	Verifica si la trama de datos ha sido enviada correctamente

Capítulo 4

RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Caracterización de los módulos de sensado inalámbrico

Dentro de los objetivos del proyecto se contempla mejorar el diseño de las tarjetas modulares para el sensado de gases tóxicos en minería, para esto se realizó:

- El modulo fase I (ver figura 4.1) está diseñado para sensar un gas, mientras que el módulo de la fase II (ver figura 4.2) están diseñados de tal manera que funcione como un multidetector es decir miden el nivel de toxicidad del metano, dióxido de carbono y un socket auxiliar para conexión de cualquier sensor que este dentro del rango de operación de la tarjeta, adicional se está verificando remotamente el nivel de carga de las baterías para tener control del funcionamiento de la red.
- El módulo de la fase II está pensado como un sistema adaptable a la conexion de diferentes sensores con salida analoga, mientras que el módulo de la fase I se considera como un sistema cerrado con capacidad de conexión de un sensor especifico ya que la instrumentación que se realizó para este sensor esta dentro del módulo lo que impide la conexión de un sensor diferente.
- El módulo de la fase II cuenta con conectores seguros libres de chispas que pueden llegar a causar accidentes, la conexión de alimentación del módulo se realiza mediante un conector mini-USB y las salidas de alarmas se realizan con borneras de presión, se utilizan sistemas optoacoplados en lugar de relés con el fin de evitar chispas que en presencia de gases explosivos pueden llegar a causar lesiones al personal de la mina.
- En la fase I del proyecto la topología red estaba limitada a la configuración por defecto de los módulos Xbee-pro DigiMesh 900, en la fase II se escoge y configura una topología tipo árbol, que permite realizar el sensado de gases en la mina reduciendo la cantidad de módulos, con esta topología se configura un módulo Xbee como coordinador y los demás módulos como routers de tal manera que los módulos routers se comuniquen entre todos y los datos de todos los sensores viajen hacia la bocamina donde se encuentra instalado el coordinador el cual está conectado a la tarjeta de desarrollo Beagle-Bone que se encarga de procesar y graficar los datos de los módulos extendidos en la galerías de la mina.
- Dentro de las recomendaciones realizadas en la fase I del proyecto se contempla mejorar la autonomía del sistema, para esto se elige unas baterías YSD 998 de descarga lenta, con capacidad de proveer 6500 mA/h a 12 V, mejorando la autonomía ya que las baterías de la fase I están en la capacidad de entregar 1000 mA/h.

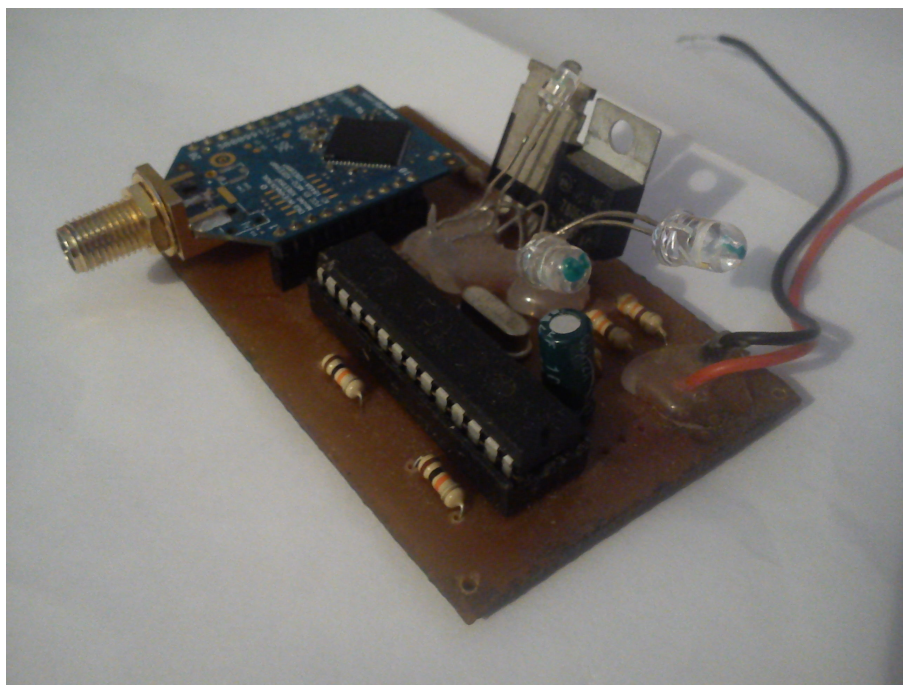


Figura 4.1: Módulo de sensado de gases fase I

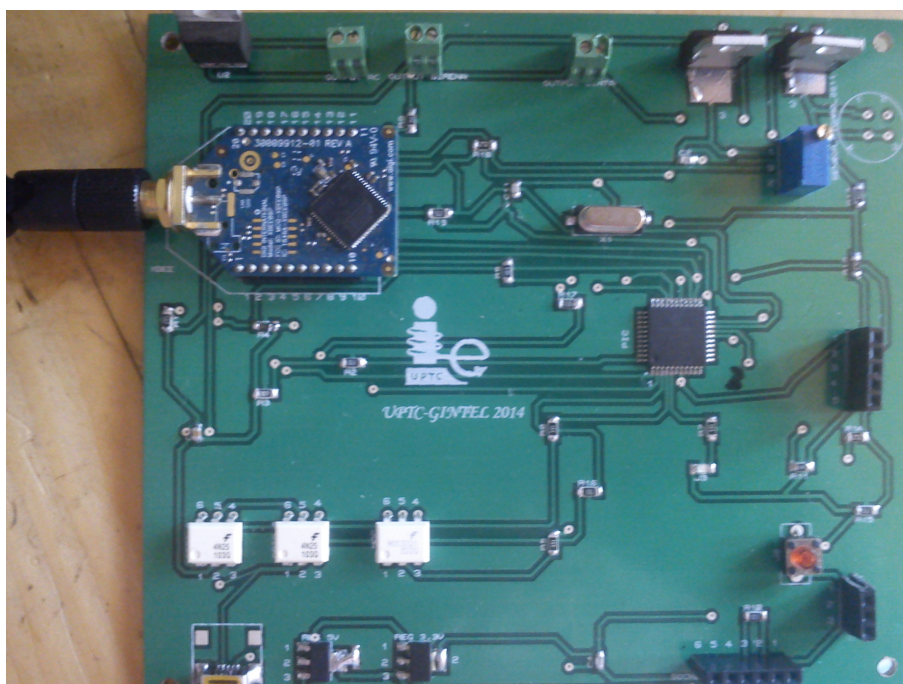


Figura 4.2: Módulo de sensado de gases fase II

4.2. Optimización del consumo de energía mediante tiempos de muestreo y configuraciones eficientes

En la realización de este proyecto se propuso optimizar el consumo de energía para los nodos determinando ubicaciones ideales, tiempos de muestreo y configuraciones eficientes. Con el propósito de definir las ubicaciones de los módulos dentro de la mina se realizaron dos pruebas en campo con visita a la mina del centro regional minero ubicado en la ciudad de Sogamoso, donde se desplegaron dos módulos de sensado de gases en las galerías 1 y 2 respectivamente y un módulo de enganche de los datos provenientes de los sensores y el nivel de batería de cada uno de los módulos, mediante esta prueba se determinó que los módulos están en la capacidad de transmitir 800 m aproximadamente, con línea de vista, esto permite cubrir el túnel principal. Las ubicaciones críticas de los módulos resultan cuando se quiere cubrir las galerías ya que estas son ortogonales al túnel principal, debido a esta característica se hace necesario colocar módulos de enganche a salida de estas galerías que permita hacer el acople de estos datos con los del túnel principal.

Los estudios existentes sobre concentración y propagación de los gases en minería, consideran que la explotación está distribuida en bloques continuos y homogéneos. Sin embargo el contenido de gas está influenciado en gran medida por:

- Aspectos geológicos presentes en la zona de explotación, tales como pliegues, fallos de rumbo los cuales sirven de vía de liberación del gas.
- Profundidad de la explotación, este es uno de los factores que más prevalece en el contenido de los gases, ya que a mayor profundidad en la explotación mayor va a ser la concentración de estos.
- Nivel de explotación, la generación de gases en minería esta determinada en gran medida por este factor ya que el gas se encuentra en los yacimientos y mientras más se esté explotando mayor va a ser la generación de gases.
- Cantidad de agua presente en la explotación, debido al efecto confinante que ejerce la presión hidrostática sobre las superficies del carbón, factor que es causante de la retención y concentración del gas ya que evita que el gas generado y acumulado en el manto sea liberado.
- Región geográfica, este parámetro influye considerablemente en la concentración de los gases ya que dependiendo de la región donde se encuentre la explotación la presión cambia generando un cambio en la propagación de los gases. [33]

Teniendo en cuentas los aspectos anteriores resulta álgido determinar un algoritmo que se adapte a las condiciones de cada mina, con el que se pueda hallar el tiempo de muestreo de datos al interior de esta. Este proyecto busca que se tenga un monitoreo continuo de los gases tanto dentro de la mina como en la plataforma web, teniendo en cuenta esta consideración y buscando tener una buena autonomía de trabajo de las baterías se plantea ciclos de vigila de 1 minuto con intervalos de 5 minutos en inactividad. Durante el minuto de vigila de los módulos toman muestras cada segundo asegurando que la plataforma web se actualice. De esta manera se logra tener un monitoreo constante y un sistema de detección seguro, mejorando visiblemente la detección de gases tradicional la cual se realiza cada cambio de turno laboral que en el mejor de los casos es de 8 horas.

Para este proyecto se utilizaron los módulos de transmisión inalámbrica Xbee-pro 900 RF, este es un módulo que está en la capacidad de transmisión a largas distancias ya que permite un buen desempeño de transmisión en espacios confinados característica importante en el sensado de gases en minería, sin embargo dentro de las mayores virtudes que poseen estos módulos es la flexibilidad para trabajar en interconexión en red, la topología en árbol que se escogió para este proyecto permite que un coordinador tome el control sobre toda la red y realice la sincronización de todos los módulos, bajo esta premisa se realiza la configuración de la red para dormir síncrono lo que permite que según los tiempos que tenga configurado el coordinador estos serán los que maneje toda la red y como están sincronizados el consumo de energía está limitado

únicamente cuando todos los módulos están en vigila y listos para transmitir y el coordinador para recibir, otra configuración que se realizo es la habilitación de los canales ADC de los módulos Xbee y junto con la habilitación de la API de los módulos permite que toda la información del módulo y los datos de todos los sensores en una sola trama lo que hace que la decodificación sea más sencilla y se pueda aumentar la velocidad en los tiempos de muestreo sin que se pierda datos.

Cumplidas las configuraciones de los módulos se realiza la medición de corriente activando los distintos dispositivos que lo componen, los resultados del consumo de corriente se muestran en la tabla 4.1, para este proyecto se propuso mejorar el consumo de energía de los módulos con respecto a los realizados en la fase I, la característica de los módulos de la fase I es que siempre se está enviando información por lo tanto el consumo de corriente es constante de 120 mA, adicional a los módulos de la fase I los módulos de la fase II incorporan alarma luminosa y sonora, salida AC y 2 sensores de detección de gases, pese a incorporar estos dispositivos que lo hacen mas completo, los módulos tiene un consumo de corriente de 140 mA cuando el Xbee está activo y 80 mA cuando se encuentra dormido, debido a que la mayor proporción del tiempo los módulos Xbee están en inactividad se considera que el sistema mejora el consumo de energía con respecto a los módulos de la fase I.

Tabla 4.1: Caracterización de consumo de energía de los módulos de sensado inalámbrico

Especificación	Consumo de corriente
Tarjeta sin Xbee y sin alarmas	70mA
Tarjeta con Xbee Activo	140mA
Tarjeta con Xbee Dormido	80mA
Tarjeta con Xbee activo y alerta luminosa	280mA
Tarjeta con Xbee dormido y alerta luminosa	220mA
Tarjeta con Xbee activo y alerta sonora	810mA
Tarjeta con Xbee activo y alerta sonora	740mA
Tarjeta con Xbee y alarmas activas	860mA
Tarjeta con Xbee dormido y alarmas activas	780mA
Consumo de cinta de leds	120mA
Consumo de sirena	600mA

4.3. Desempeño del servidor web

Dentro del desarrollo del proyecto se propuso crear un servicio web simple en software libre, este se realizo implementando un servidor web en Python en el cual se pueden ver tanto los niveles de toxicidad de cada uno de los sensores implementados en la mina, como los niveles de carga de las baterías de cada módulo esto se muestra en la figura 4.3, la actualizacion de los datos se realiza mediante un servicio que se ejecute de manera paralela, este servicio se ejecutó de manera eficiente dando como resultado la toma de datos, estos datos se escribieron en un archivo de texto plano, en el cual se puede consultar cual fue el último dato tomado que correspondería al dato más actual de los niveles de toxicidad de gases en dicho módulo.

Para la puesta en funcionamiento del servidor web es necesario que en la mina en donde se desee implementar el proyecto provea del servicio de internet, ya sea una red cableada o una red WIFI, para todo estos inconvenientes se contemplaron las soluciones, cuando en la mina no exista una conexión directa a internet esta se realizara mediante una conexión directa a la Beaglebone, que estará alojada en la dirección IP 192.168.7.2, en la cual solo la persona que esté conectada directamente puede llegar a visualizar los datos. Si por el contrario en la mina hay servicio de internet la aplicación se ejecutara en una red LAN, es decir

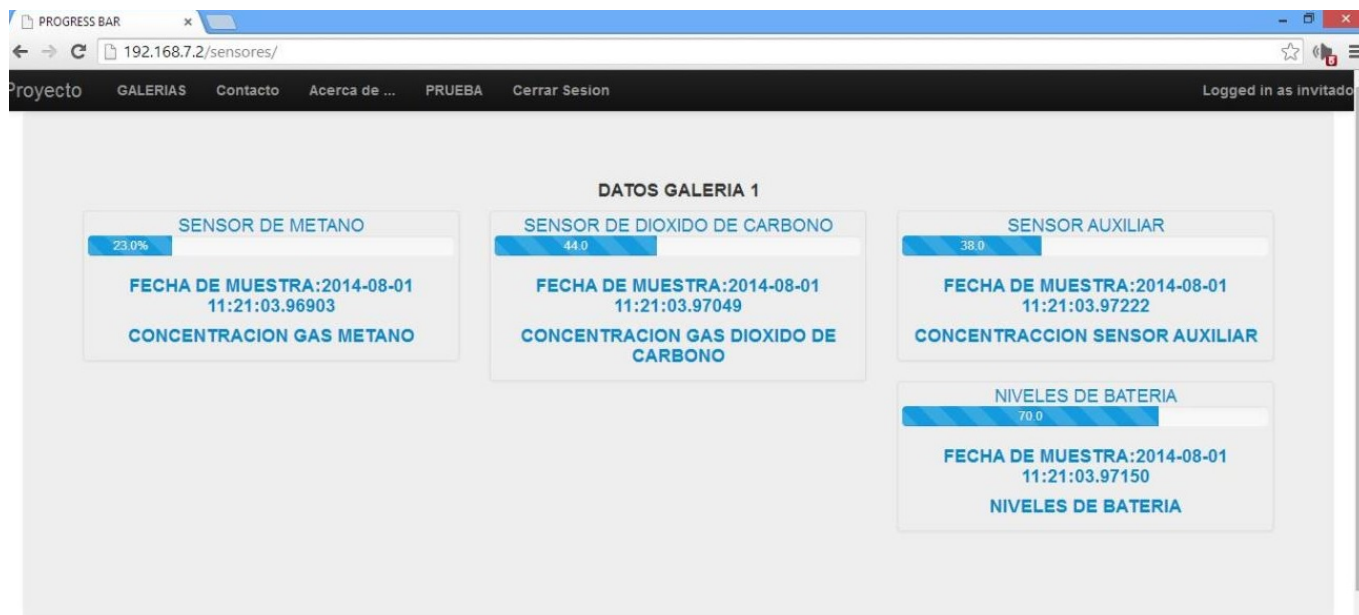


Figura 4.3: Interfaz web de los datos tomados en la galería 1 mina Sena morca Sogamoso

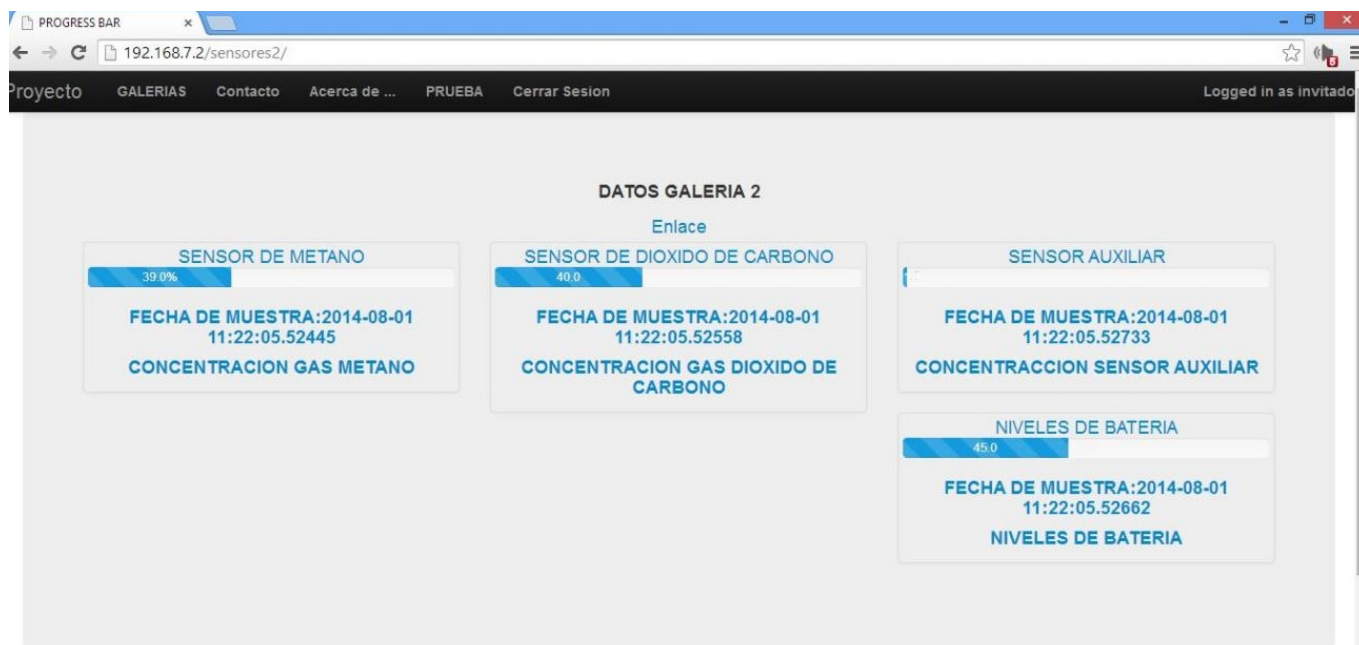


Figura 4.4: Interfaz web de los datos tomados en la galería 2 mina Sena morca Sogamoso

todo aquel que esté conectado a la red puede llegar a observar los datos, y dado el caso en que la mina provea internet y además tenga disponible una red IP pública fija, en este caso la aplicación se ejecutara en dicha red IP, con lo que se podrían ver los datos desde cualquier punto de conexión a internet.

Dentro de los resultados que se obtuvieron está el comportamiento del nivel de batería de cada uno de los módulos, esto se observa en la gráfica 4.5 en la cual se observa el comportamiento de descarga de la batería, los resultados tienden a oscilar debido a la velocidad de toma de los datos, en este caso se prueba una batería que ya se ha descargado un 30 %, lo que indica que el nivel de batería ha descendido 3.6 V siendo 12 V , el voltaje proporcionado por la batería al estar al 100 % de nivel de carga. La duración de las pruebas fue de aproximadamente 60 minutos dando como resultado que el nivel de batería descendió un 2 %, considerando que en este transcurso de tiempo se activaron las alarmas tanto luminosas como sonoras.

Figura 4.5: Historial del comportamiento de la batería galería 1

4.23 V, en la gráfica 4.6 se observa que tenemos alrededor de un 40 % lo que significa que en dicho momento se tendría una concentración de 4000 ppm, o igual al 0.4 % de concentración en el aire.

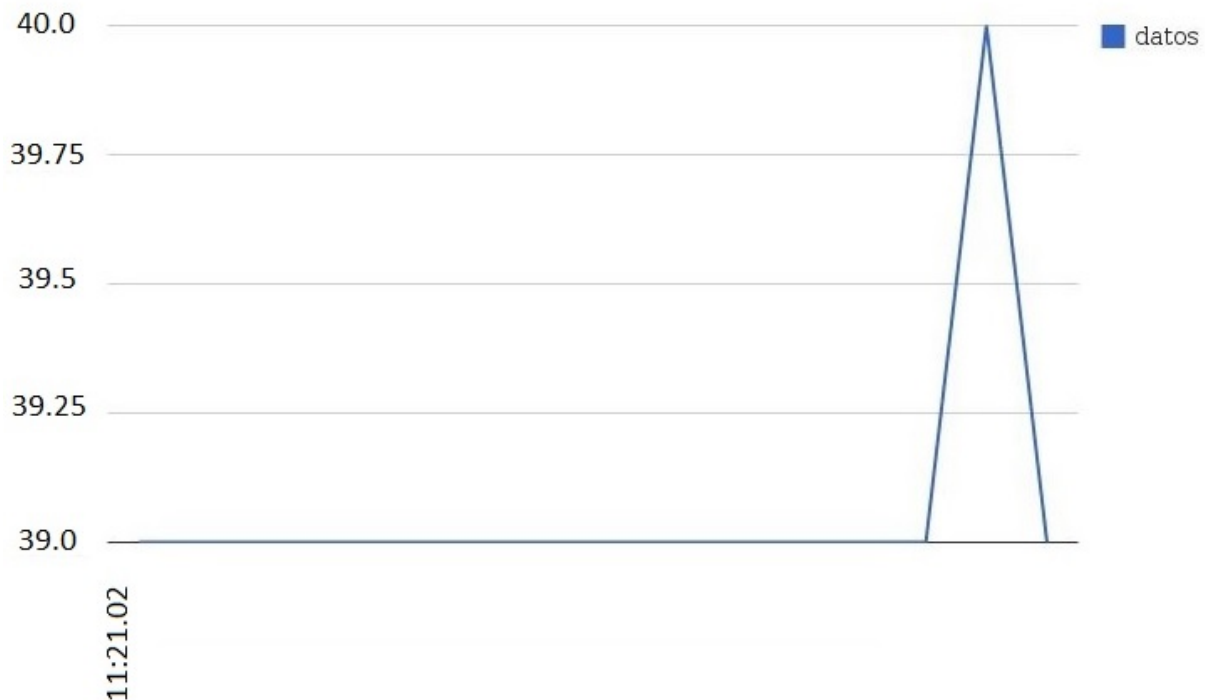


Figura 4.6: Historial del comportamiento del sensor de metano galería 2

4.4. Caracterización del sistema en campo

Dentro del desarrollo del proyecto se realizaron dos visitas a la mina didáctica del centro minero Morca Sogamoso, en las cuales se evaluaron los aspectos más importantes en el funcionamiento del proyecto, estos aspectos fueron: transmisión de datos dentro de ambientes confinados, distancias máximas de transmisión de datos, inconvenientes en la transmisión de datos de RF, pruebas de alarmas, puesta en funcionamiento del sistema completo.

Debido a la robustez de los módulos Xbee pro digimesh 900 se logró realizar satisfactoriamente la prueba de transmisión de datos dentro de un ambiente confinado como lo son las minas, teniendo en cuenta todos los factores que intervienen en el entorno natural de una mina bajo tierra.

Con respecto a la distancia máxima de transmisión de datos de los módulos Xbee, dice el fabricante que son 3 km con línea de vista, para el caso se instaló en el túnel más largo que tiene esta mina que son de aproximadamente 800 m con línea de vista dando como resultado que los datos provenientes de los sensores se registraron en el servidor web el cual estaba ubicado a la entrada de la mina un ejemplo de la visualización de estos datos se puede ver en la figura 4.4, cabe resaltar que en este trayecto se encuentran ubicados objetos que pueden que interfieren con la transmisión de los datos, como lo son las vagonetas, los ventiladores y las

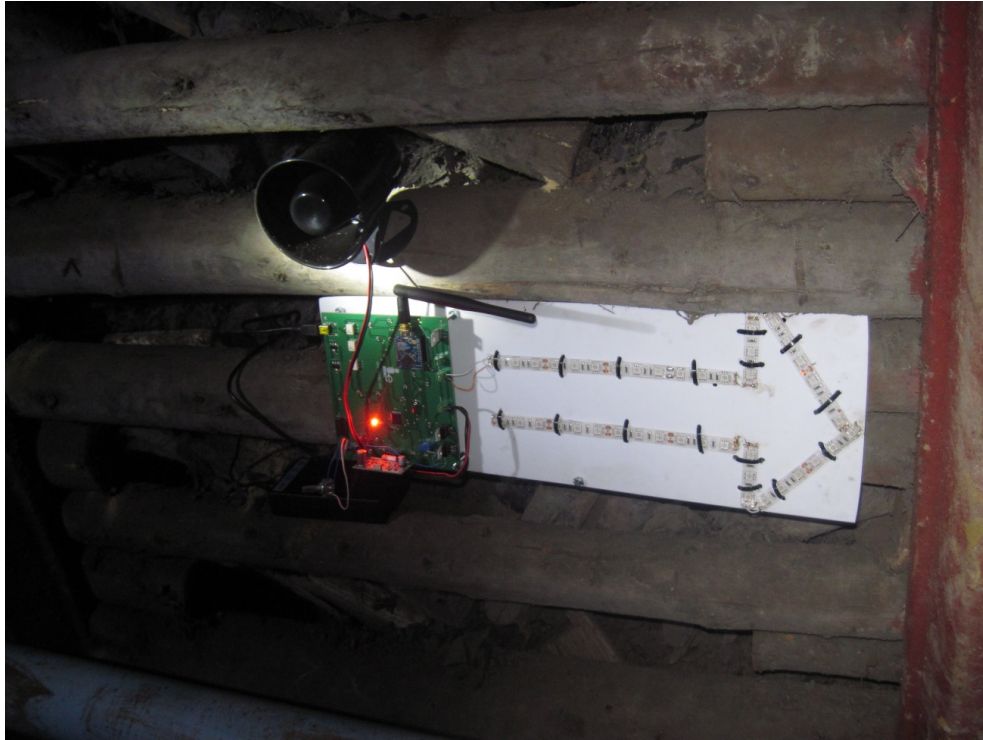


Figura 4.7: Módulo implementado en la galería 1 estado en operación normal

estructuras metálicas que sostienen la mina, sin embargo la prueba fue satisfactoria al lograr realizar una comunicación de los datos entre los módulos de sensado de gases y el modulo coordinador de la red.

Los mayores inconvenientes que se presentaron en la transmisión de datos fueron aquellos lugares donde se tenían curvas cerradas, ya que la señal se pierde, por esto se hace necesario ubicar módulos repetidores en estos espacios con el fin de que el repetidor tome la señal y la reenvíe hasta el destinatario final, esta retransmisión se realizó de manera óptima ya que todos los componentes de la trama llegaron hasta su destinatario final (coordinador de la red).

Se realizaron pruebas de funcionamiento de alarmas, las cuales se instalaron en el módulo y se les aplico una señal continua de 12 V dando como resultado que tanto la alarma sonora como la alarma luminosa son apropiadas ya que la alarma sonora se escucha en un radio bastante grande debido a que se escogió de 20 w, con respecto a las alarmas luminosas se diseñaron una serie de flechas (ver figura 4.8) en cinta leds, de bajo consumo de energía las cuales tendrán que guiar al personal por la ruta de evacuación en caso de emergencia.

Para la parte de la prueba en conjunto del sistema, se ubicaron los módulos en la galería uno (ver figura 4.9) y galería dos(ver figura 4.10), y un tercero que sirviese de repetidor de la señal, en el primer módulo se colocó un sensor de dióxido de carbono, un potenciómetro que simulaba el sensor de metano, la alarma luminosa y una alarma sonora, para el segundo módulo se colocó un sensor de metano, un sensor de dióxido de carbono y un potenciómetro que simulaba la otra entrada del sistema, cada módulo fue conectado a la batería de alimentación a una tensión de 12 V, y se evaluaron los resultados.

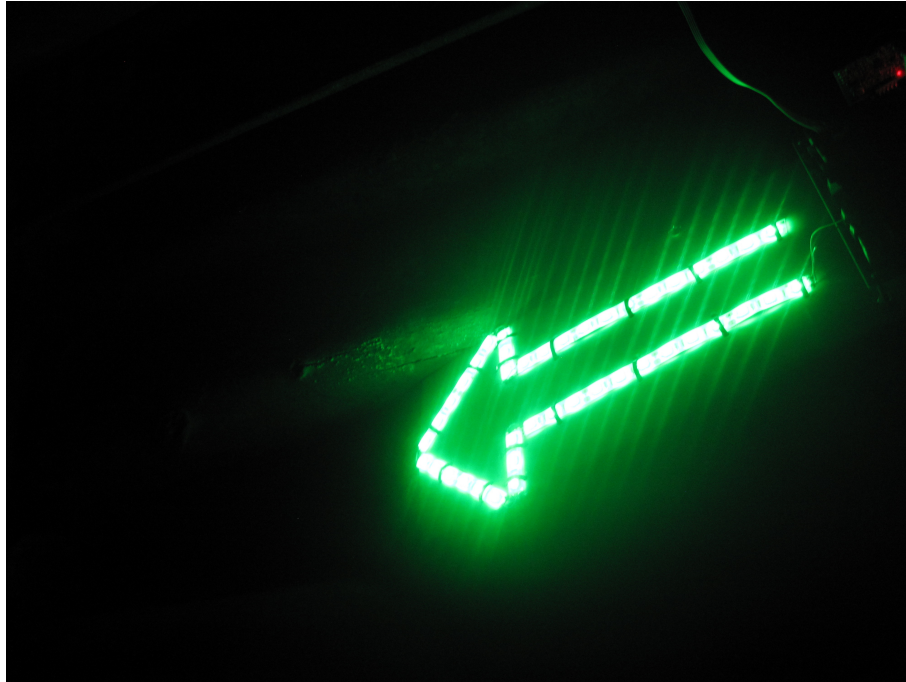


Figura 4.8: Alarmas luminosas diseñadas



Figura 4.9: Módulo galería 1

Se le realizó una perturbación al sensor de dióxido de carbono para observar que hubiese los cambios esperados en la página web, el servidor web tomó las señales de forma correcta ya que se logró observar como cambiaban los datos de la misma forma en que se variaban en el módulo, la perturbación a este sensor se aumentó hasta llegar a los 4000 ppm, esto hizo que se activaran las alarmas, tanto luminosa como sonora y se mantuvieron activas hasta que los niveles disminuyeron, los rangos se pueden variar teniendo en cuenta el tipo de sensor y sus niveles permitidos, para el módulo de la galería dos se varió el potenciómetro de



Figura 4.10: Módulo galería 2

manera que no sobrepasara los niveles, en dicho momento el servidor proceso los datos de manera correcta al almacenarlos para la visualización del historial, luego este potenciómetro se movio de tal manera que sobrepaso los umbrales en ese preciso momento se activó la alarma luminosa, y solo se apagó hasta que descendió el nivel de tensión en el potenciómetro.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Considerando las pruebas de transmisión de datos de los módulos dentro la mina, es necesario establecer la ubicación precisa de estos con el fin de garantizar que la red este sensando en todos los puntos críticos de la mina y además que si un módulo deja de funcionar el rango de cobertura de este debe ser reemplazado por el más próximo para evitar perder datos de los módulos más interiores.

Se debe tener presente que el nivel de los umbrales para las alarmas de los módulos está sujeto al valor de calibración de los sensores, debido a esto es recomendable realizar calibraciones periódicas para garantizar que el nivel de los gases este dentro de los rangos permisibles para la explotación bajo tierra.

El desempeño de los módulos diseñados fue el esperado, ya que envió las tramas correspondientes a las entradas que se tienen en el módulo, procesando e identificando los niveles críticos de los gases como el de la batería y activando las respectivas señales de peligro encontradas en cada módulo.

El funcionamiento del servidor web montado en la plataforma de desarrollo Beaglebone, fue el esperado ya que esta procesó los datos que se tenían en el buffer de entrada escribiendo los niveles de toxicidad de gases como el de nivel de baterías en los archivos correspondientes, que serán de gran ayuda a la hora de graficar los historiales de datos de cada módulo.

Para la implementación continua del sistema de sensado en minería subterránea es de vital importancia que los módulos estén protegidos, para esto se recomienda la construcción de una caja que cumpla con las condiciones de seguridad minera.

Uno de los mayores retos que afronta la explotación minera es solucionar el consumo de energía eléctrica ya que para evitar accidentes se mantienen activos gigantes turbinas que se encargan de ventilar la mina continuamente, conociendo el nivel de los gases dentro de la mina se puede tener control sobre la actividad de las turbinas reduciendo en gran medida el consumo de energía.

En la topología implementada se permite la comunicación en ambos sentidos con lo que se recomienda desarrollar una aplicación que permita que la comunicación fluya desde el nodo coordinador hacia los nodos routers, con el fin de poder reprogramar módulos, ajustar valores de referencia y señales de control en dado caso que se implementen sistemas de control de nivel de gases.

Por sus características dentro de las minas el metano es considerado como un gas que solo tiene efectos nocivos en el entorno, sin embargo esta es una de las fuentes de energías limpias presentes en la naturaleza, se recomienda diseñar un sistema que me permita aprovechar esta fuente de energía, haciendo más sostenible la labor de la explotación minera.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. R. Echeverri, S. H. R. Cano, and J. A. J. Builes, “Detección y control de atmósferas explosivas en minas subterráneas de carbón usando programación estructurada,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 7, no. 14, pp. 10–21, 2012.
- [2] C. C. C. Quiceno and J. M. M. Escobar, “Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 29, pp. 73–85, 2011.
- [3] S. Molina, I. Soto, and R. Carrasco, “Detection of gases and collapses in underground mines using WSN,” in *Proc. IEEE Industrial Technology (ICIT) International. Conf.*, 2011, pp. 219–225.
- [4] Y. Li, H. Song, H. Chen, and S. Ma, “Design of automatic system for multiple-gas sensing,” in *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC). Conf.*, 2011, pp. 1–4.
- [5] T. Bhattacharyya, S. Sen, D. Mandal, and S. Lahiri, “Development of a wireless integrated toxic and explosive mems based gas sensor,” in *Proc. IEEE 19th International. Conf.*, 2006, pp. 4–pp.
- [6] C. Li, Y. Wang, and X. Guo, “The application research of wireless sensor network based on Zigbee,” in *Proc. IEEE Multimedia and Information Technology (MMIT). 2th International. Conf.*, 2010, vol. 2, pp. 89–92.
- [7] J. A. B. Velandia and J. N. P. Castillo, “Redes inalámbricas de geosensores aplicadas en sistemas de observación y monitoreo ambiental,” *Gerencia Tecnológica Informática*, vol. 11, no. 29, pp. 59–68, 2012.
- [8] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.
- [9] L. ciencia para todos, “Inicio de las comunicaciones inalámbricas Marcon XVIII.” sept. 2014. [Online]. Available: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_20.htm
- [10] C. Vilorio Núñez, J. Cardona Peña, and C. Lozano Garzón, “Análisis comparativo de tecnologías inalámbricas para una solución de servicios de telemedicina,” *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 25, no. 25, 2011.
- [11] J. Mayné, “Estado actual de las comunicaciones inalámbricas,” *en línea*.
- [12] S. F. O. Aguirre, “Near Field Communication.”
- [13] F. L. Suárez, D. O. Valencia, L. A. Álvarez, and S. Serna, “Ethernet y Zigbee para aplicaciones de consumo y administración de la energía.”
- [14] V. R. J. Carlos, “El estándar inalámbrico zigbee,” *Trujillo, Perú*, 2007.
- [15] L. V. Guagchinga Moreno and E. M. Guamaní Mena, “Diseño e implementación de un sistema de medición electrónico de gases contaminantes y contaminación acústica en dos lugares de la ciudad de Latacunga utilizando un sistema de transmisión basado en tecnología Zigbee.” Ph.D. dissertation, Latacunga/Espe/2012.

- [16] G. C. Garrido, "Caracterización del consumo en redes Zigbee/802.15.4," 2009.
- [17] R. Faludi, *"Building wireless sensor networks: with Zigbee, Xbee, arduino, and processing"*. O'Reilly Media, Inc., 2010.
- [18] D. I. Inc., "Antenna connection options," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www.digi.com/support/kbase/kbaseresultdetl?id=2167>
- [19] D. Gascón., "Wireless sensor networks," sept. 2014. [Online]. Available: <http://sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>
- [20] C. A. Suescún, "Revisión del estado del arte de redes de sensores inalámbricos," *Revista Politecnica*, vol. 1, no. 8, 2012.
- [21] J. A. G. Pulido, F. L. M. García, E. J. D. Álvarez, J. M. L. Gutiérrez, M. A. V. Rodríguez, and J. M. S. Pérez, "Experiencias con redes de sensores inalámbricos en la Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura."
- [22] I. J. R. H., "Modulo de capacitación técnico ambiental empresa minera macdesa," sept. 2014. [Online]. Available: http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=398
- [23] I. Charris, "El metano un deposito minero," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www.fenalcarbon.org.co/fenalcarbon.2012/memorias/gas.metano.pdf>
- [24] R. O. David and Á. N. Andrés, "Instrumento de medición de gas metano para uso ambiental dirigido a humedales."
- [25] R. seguridad Minera, "Guía de sustancias: Monóxido de carbono," sept. 2014. [Online]. Available: <http://revistaseguridadminera.com/materiales-peligrosos/guia-de-sustancias-monoxido-de-carbono/>
- [26] D. de salud y servicios de salud New Jersey, "Hoja informativa de sustancias peligrosas," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www2.udec.cl/matpel/sustanciaspdf/o/OXIDONITRICO.pdf>
- [27] M. de Minas y Energia., "Mineria," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Memorias/Memorias.2013/3-Minas>
- [28] M. T. Inc., "Pic 16f877a," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010242>
- [29] Elektronika-Dasar., "El sensor de metano tgs 2611," sept. 2014. [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010242>
- [30] CompanyUL, "Standards ul 1484," sept. 2014. [Online]. Available: <http://site.ul.com/global/eng/pages/aboutul>
- [31] ENTWURF, "Electrical apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises," sept. 2014. [Online]. Available: <https://shop.austrian-standards.at/Preview.action;jsessionid=A516F6540BDC13DACFA679E34D5F6F32?preview=&dokkey=289449&selectedLocale=en>
- [32] P. S. Foundation, "Python," sept. 2014. [Online]. Available: <https://www.python.org>
- [33] L. Mojica and J. Mariño, "Estado de la exploración y posibilidades de gas asociado al carbón (gac) en boyaca (colombia)," *Boletín de Geología*, vol. 35, no. 2, 2013.